

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/018330

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ H01J37/317

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ H01J37/30-37/317

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

| | | | |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2005 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2005 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2005 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| X | JP 6-188215 A (SUPERION LTD.), 08 July, 1994 (08.07.94), | 1, 4-8, 10-12, 17 |
| Y | Par. Nos. [0027] to [0045]; Figs. 4 to 10 & EP 445964 A2 & US 5099130 A | 2, 3, 9, 13-16 |
| Y | JP 11-354064 A (ULVAC Japan Ltd.), 24 December, 1999 (24.12.99), Par. Nos. [0016] to [0018]; Figs. 1, 2 (Family: none) | 2, 3, 9, 13-16 |
| Y | JP 7-302568 A (Hitachi Chemical Co., Ltd.), 14 November, 1995 (14.11.95), Par. Nos. [0004], [0005] (Family: none) | 9 |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
04 March, 2005 (04.03.05)

Date of mailing of the international search report
22 March, 2005 (22.03.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/018330

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| Y | JP 2002-175771 A (Kabushiki Kaisha Arubakku), 21 June, 2002 (21.06.02), Par. No. [0022] (Family: none) | 15,16 |
| A | JP 6-196118 A (Eaton Corp.), 15 July, 1994 (15.07.94), Full text; all drawings & EP 581440 A1 & US 5373164 A | 1-27 |

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl.⁷ H01J37/317

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
Int. Cl.⁷ H01J37/30-37/317

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
日本国公開実用新案公報 1971-2005年
日本国実用新案登録公報 1996-2005年
日本国登録実用新案公報 1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|---|------------------|
| X | JP 6-188215 A (スーペリオン・リミテッド) 1994.07.08, 段落【0027】-【0045】, 図4-図10 | 1,4-8,10-12,17 |
| Y | & EP 445964 A2 & US 5099130 A | 2,3,9,13-16 |
| Y | JP 11-354064 A (日本真空技術株式会社) 1999.12.24, 段落【0016】-【0018】, 図1, 図2 (ファミリーなし) | 2,3,9,13-16 |
| Y | JP 7-302568 A (日立化成工業株式会社) 1995.11.14, 段落【0004】, 【0005】 (ファミリーなし) | 9 |

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日
04.03.2005

国際調査報告の発送日
22.3.2005

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁 (ISA/JP)
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
河原 英雄

2G 8506

電話番号 03-3581-1101 内線 3225

| C (続き). 関連すると認められる文献 | | |
|----------------------|--|------------------|
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
| Y | JP 2002-175771 A (株式会社アルバック) 2002.06.21, 段落【0022】 (ファミリーなし) | 15, 16 |
| A | JP 6-196118 A (イトン コポレーション) 1994.07.15, 全文, 全図 & EP 581440 A1 & US 5373164 A | 1-27 |

明 細 書

イオンビーム装置

<技術分野>

この発明は、ターゲットにイオンビームを照射してイオン注入を行うイオン注入装置ならびに当該イオン注入装置を構成するものであってイオンビームの走査および偏向を行うイオンビーム偏向装置等を包含した概念のイオンビーム装置に関し、より具体的には、イオンビームのビームライン長を短くすることを可能にしたイオンビーム装置に関する。

<背景技術>

イオン注入装置のようなイオンビーム装置(以下、イオン注入装置で代表する。)においては、従来から、ターゲット(例えば半導体基板)の面内においてイオンビームの入射角を均一にするために、イオンビームの平行化が行われている。

また、ターゲットに、所望エネルギーのイオンと共に、不所望エネルギーのイオン(これを、「エネルギー汚染物質」または「エネルギーコンタミナント」と言う。)が注入されること(これを、「エネルギー汚染」または「エネルギーコンタミネーション」と言う。)を防止するために、不所望エネルギーのイオンの除去(これを、「エネルギー分離」または「エネルギー分析」と言う。)が行われている。

上記のイオンビームの平行化とエネルギー分離とは、従来は、別々の機能要素によって行われていた。

このため、イオンビームのビームライン長が長くなり、イオンビームの発散等による損失が大きくなり、ビーム輸送効率の低下を招き、十分なビーム量を確保することが難しいという課題があった。特に、低エネルギーでのイオンビームの輸送においては、イオンビームの空間電荷効果が顕著に現れてイオンビームが発

散してその効率の良い輸送が困難になるので、ビームライン長をできるだけ短くすることが可能なイオン注入装置が望まれていた。

従来技術の具体例を挙げると、特開平 3-233845 号公報（第 1 頁右欄～第 2 頁左上欄、第 6 図）（以下、特許文献 1 とする）には、静電偏向によるエネルギー分離技術が記載されている。しかし、ここでエネルギー分離に用いられている静電偏向電極は、平行平板型の電極であって、イオンビームはその静電偏向電極によって平行化されるものではない。イオンビームの平行化には、平行化のためだけに設けられた別の平行平板型の走査電極によって行われている。従って、前述したようにビームライン長が長くなるという課題がある。

他のエネルギー分離技術としては、最終エネルギーにまでイオンビームが加速された後に（即ち下流側に）偏向電磁石を配置して、そこでのイオンビームの旋回半径 R_1 が次式で決まることを用いるものがある。ここで、 B は磁束密度、 m はイオンビームを構成するイオンの質量、 q は電荷、 V_1 はイオンビームの加速電圧でありエネルギーに相当する。

〔数 1〕

$$R_1 = (1/B) \times (2mV_1/q)^{1/2}$$

このような技術は、例えば特許第 3358336 号公報（段落 0002、0003、図 1）（以下、特許文献 2 とする）にエネルギー分析マグネットとして記載されている。しかし、ここで用いられている技術は、走査も平行化も行われていないイオンビームに対して行われるものであり、イオンビームの平行化には、平行化のためだけに設けられた別のビーム平行化マグネットと名付けられた偏向電磁石によって行われている。従って、前述したようにビームライン長が長くなるという課題がある。

これに対して、走査されたイオンビームに対しての平行化とエネルギー分離とを一つの要素（扇型電磁石）によって行う技術が、特開平 11-354064 号公報（段落 0016～0018、図 1）（以下、特許文献 3 とする）に記載されている。

上記特許文献 3 に記載の技術は、イオンビームの平行化とエネルギー分離とを、扇型電磁石と名付けられた偏向電磁石を用いて行うものである。イオンビームのエネルギー（数 1 の V_1 に相当）および所望イオンの質量 m が大きくなると、例えば 200 keV 以上のエネルギーのインジウム（In）イオンを取り出そうとすると、前記数 1 から分かるように、一定の旋回半径 R_1 を実現するためには、磁束密度 B を非常に大きくしなければならず、そのためには偏向電磁石を構成する鉄心およびコイルが非常に大きくなり、偏向電磁石が巨大化する。また、偏向電磁石の重量やコスト、偏向電磁石用の電源等も大きくなるという課題がある。

しかも、特許文献 3 に記載の技術は、静電偏向器と名付けられた走査器によってイオンビームが走査されている面内でイオンビームが偏向電磁石によって偏向されるので、偏向電磁石におけるイオンビームの偏向角を非常に大きくしないと、エネルギー分離が十分に行えず、不所望エネルギーイオンの除去が十分に行えないという課題がある。これは、所望エネルギーのイオンビームも不所望エネルギーのイオンも走査器によって走査されて広がっているので、この広がったもの同士を同一面内で互いに分離するためには、細かいイオンビームを分離する場合と違って、あるいは異なった面内で分離する場合と違って、イオンビームの偏向角を非常に大きくしなければならないからである。偏向角を非常に大きくするということは、前記数 1 に示した磁束密度 B を非常に大きくして旋回半径 R_1 を非常に小さくすることであり、その場合には前記と同様の課題がある。

偏向電磁石における偏向角をあまり大きくせずに、不所望エネルギーのイオンがターゲットに入射する課題を解決しようとする、偏向電磁石出口からターゲットまでの距離を大きくしなければならず、その結果、ビームライン長が長くなるという課題が生じる。

更に、偏向電磁石の中やその上下側で、イオンビームと雰囲気中に残留している分子とが衝突する等によって生じた中性粒子は偏向電磁石中を直進するため、偏向電磁石における偏向角を大きくするかまたは偏向電磁石からターゲットまでの距離を大きくしないと、直進した中性粒子がターゲットに入射し、それによっ

てターゲットに対する注入不均一性が生じる。これを解決するためには、偏向電磁石における偏向角を大きくすることと、偏向電磁石出口からターゲットまでの距離を大きくすることの少なくとも一方を採用しなければならず、いずれにしても、やはり、ビームライン長が長くなるという課題がある。

<発明の開示>

本発明は、イオンビームの平行化およびエネルギー分離を行うことができ、しかもイオンビームのビームライン長を短くすることを可能にしたイオンビーム装置を提供することを主たる目的としている。

本発明に係る第1のイオンビーム装置は、イオンビームが入射され当該イオンビームを、一定の走査面内で一定の走査中心を中心にして走査して取り出す走査器と、この走査器からのイオンビームが入射され当該イオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記走査中心を中心とする円弧状の偏向領域で、前記走査面に垂直な方向に進むように静電的に90度偏向して取り出す静電偏向器とを備えることを特徴としている。このイオンビーム装置は、イオンビームの走査および偏向を行う構成であるので、イオンビーム偏向装置と呼ぶこともできる。

本発明に係る第2のイオンビーム装置は、イオンビームを射出するイオン源と、このイオン源からのイオンビームが入射され当該イオンビームから所望質量のイオンビームを分離して取り出す質量分離電磁石と、この質量分離電磁石からのイオンビームが入射され当該イオンビームを、一定の走査面内で一定の走査中心を中心にして走査して取り出す走査器と、この走査器からのイオンビームが入射され当該イオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記走査中心を中心とする円弧状の偏向領域で、前記走査面に垂直な方向に進むように静電的に90度偏向して取り出す静電偏向器と、イオン注入すべきターゲットを保持して当該ターゲットを、前記静電偏向器から取り出されたイオンビームに一定の角度で交差する方向に機械的に往復走査する走査機構とを備えることを特徴としている。このイオンビーム装置は、イオンビームの走査、偏向およびターゲットへの入射等を行う構成であるので、イオン注入装置と呼ぶこともできる。

上記イオンビーム装置によれば、走査器によって走査されたイオンビームは、扇状に広がって静電偏向器に入射する。

静電偏向器に入射したイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームは、前記走査中心を中心とする円弧状の偏向領域で、前記走査面に垂直な方向に進むように静電的に90度偏向されて、静電偏向器から取り出される（出射する）。

このようにして静電偏向器から取り出された所望エネルギーのイオンビームを構成する1本1本のイオンビームは、互いに平行である。これは、一つの面に立てた複数本の垂線が互いに平行であるのと同様に、一つの走査面に垂直に出射する各イオンビームは、その走査位置に拘わらず、互いに平行であるからである。このようにして、静電偏向器から出射するイオンビームの平行化を行うことができる。

静電偏向器に入射したイオンビームの内の不所望エネルギーのイオンは、所望エネルギーのイオンビームとは偏向半径（旋回半径）が異なるので、所望エネルギーのイオンビームから分離される。このようにして、エネルギー汚染物質の除去、即ちエネルギー分離を行うことができる。

しかも、静電偏向器におけるイオンビームの偏向方向は、走査器におけるイオンビームの走査方向とは垂直方向であり、特許文献3に記載されている技術と違って、走査器によって走査されて広がったエネルギーの異なるイオンビーム同士を同一面内で互いに分離するのではなく異なった面内で互いに分離するので、異エネルギーイオンの分離は容易であり、従ってエネルギー分離機能は非常に大きい。加えて、静電偏向器におけるイオンビームの偏向角度が90度と大きいので、この観点からも、異エネルギーイオンの分離は容易であり、従ってエネルギー分離機能は非常に大きい。この両者が相俟って、静電偏向器におけるエネルギー分離機能は極めて大きい。

また、静電偏向器の場合は、偏向電磁石の場合と違って、偏向角度を大きくすることは、当該静電偏向器を曲げることで等によって比較的簡単に実現することができるので、しかも偏向角度はイオンの質量に依存せず大きな質量のイオンを偏向することも容易であるので、偏向角度を90度と大きくしても、特許文献3に

記載されている偏向電磁石が有する前記巨大化等の課題発生を避けることができる。

上記のように、この発明に係るイオンビーム装置によれば、一つの静電偏向器によって、イオンビームの平行化とエネルギー分離の両方を行うことができるので、両者を特許文献1または2に記載の技術のように別々の機能要素によって行う場合に比べて、イオンビームのビームライン長を短くすることができる。

更に、上記のように静電偏向器におけるエネルギー分離機能は極めて大きいので、特許文献3に記載の技術に比べて、静電偏向器出口からターゲットまでの距離を大幅に短くすることができる。従ってこの観点からも、イオンビームのビームライン長を短くすることができる。

本発明に係る第3のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記走査機構は、前記ターゲットをその表面に平行に走査するものであっても良い。

本発明に係る第4のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、上記イオンビーム装置の前記静電偏向器は、例えば、間隔をあけて相対向する一対の偏向電極を有している。

本発明に係る第5のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、上記イオンビーム装置において、一点で互いに直交する三つの軸をX軸、Y軸およびZ軸としたとき、例えば、前記走査器に入射するイオンビームは、Z軸に平行に前記走査器に入射するものであり、前記走査器は、前記入射されたイオンビームをY-Z平面に平行な前記走査面内で前記走査中心を中心にして走査するものであり、前記静電偏向器は、前記入射されたイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを90度偏向させてX軸に平行に出射するものであり、前記走査かつ偏向されたイオンビームの内で所望エネルギーを有するイオンビームの1本のイオンビームの軌道を考えたとき、当該軌道は、直線部の先端に、X軸に平行になるように弧状に90度曲がった弧状部を有しており、前記静電偏向器を構成する一対の偏向電極の相対向面は、それぞれ、前記1本のイオンビームの

軌道を前記走査中心を通り X 軸に平行な軸を中心にして前記走査方向に所定角度回転させたときに前記弧状部が描く回転面に概ね沿う形状をしている。

本発明に係る第 6 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記偏向電極を構成する一对の偏向電極の相対向面は、それぞれ、トーラスを、前記走査中心を通り X 軸に平行なトーラス中心軸を中心とする円周方向に所定角度だけ切り取り、かつトーラスの縦断面の外周が形成する円弧を 90 度だけ切り取った形状をしていても良い。

本発明に係る第 7 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記偏向電極を構成する一对の偏向電極の相対向面は、それぞれ、前記回転面に概ね沿う複数の面を組み合わせて形成されていても良い。

本発明に係る第 8 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器を構成する一对の偏向電極の内の少なくとも一方は、偏向角の増大方向に隙間をあけて複数の面に分割されていても良い。

本発明に係る第 9 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器を構成する一对の偏向電極の少なくとも相対向面は、それぞれ、カーボンで形成されていても良い。

本発明に係る第 10 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器を構成する一对の偏向電極に、直流電圧であって接地電位に対して対称の偏向電圧をそれぞれ印加する偏向電源を備えていても良い。

本発明に係る第 11 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記走査器は、それに入射するイオンビームをその入射軸に対して対称に走査するものであっても良い。 本発明に係る第 12 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記走査器は、当該イオンビームをその入射軸に対して片側方向においてのみ走査するものであっても良い。

本発明に係る第 13 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記走査器と静電偏向器との間に設けられていて前記走査されたイオンビームを静電的に加速または減速する加減速器を更に備えていて、この加減速器はイオンビームの進行方向に一定の間隔をあけて配置された少なくとも 2 枚の電極

を有していて、この各電極は、前記走査中心を中心とする円弧状をしていると共に、前記走査されたイオンビームの走査方向の幅よりも幅の広いビーム通過穴を有していても良い。

本発明に係る第14のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記加減速器を構成する入口の電極が、所望質量のイオンビームを通過させ不所望質量のイオンを阻止する分析スリットを兼ねていてもよい。

本発明に係る第15のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器の出口付近に、所望エネルギーのイオンビームを通し不所望エネルギーのイオンを阻止するビームマスクを設けても良い。

本発明に係る第16のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器を出たイオンビームの、その進行方向に垂直な走査ビーム断面の形状は弧状をしており、前記ビームマスクは、この弧状の走査ビーム断面にほぼ相似形の弧状のビーム通過穴を有していても良い。

本発明に係る第17のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記走査器は互いに平行な一对の走査電極を有していて、この一对の走査電極間に、 $V_s = c t / (1 - c^2 t^2)^{1/2}$ 、(cは定数、tは時間)で表される走査電圧 V_s を印加する走査電源を備えていても良い。

本発明に係る第18のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器に、それに入射するイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記のように偏向させながら減速する機能を持たせても良い。

本発明に係る第19のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器に、それに入射するイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記のように偏向させながら加速する機能を持たせても良い。

本発明に係る第20のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極の相対向面間の間隔は、出口に向かって広がっていてもよい。

本発明に係る第 2 1 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極の相対向面間の間隔は、出口に向かって狭くなっていてもよい。

本発明に係る第 2 2 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極は、それぞれ偏向角の増大方向に n 個 (n は 2 以上の整数) に分割されていて n 組の偏向電極を形成しており、当該 n 組の偏向電極の内の内側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{a1} 、 V_{a2} 、 \dots 、 V_{an} とし、当該 n 組の偏向電極の内の外側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{b1} 、 V_{b2} 、 \dots 、 V_{bn} としたとき、次の関係を満たしていてもよい。

$$V_{a1} < V_{a2} < \dots < V_{an},$$

$$V_{b1} < V_{b2} < \dots < V_{bn}, \text{ かつ、}$$

$$V_{a1} < V_{b1}, V_{a2} < V_{b2}, \dots, V_{an} < V_{bn}$$

本発明に係る第 2 3 のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極は、それぞれ偏向角の増大方向に n 個 (n は 2 以上の整数) に分割されていて n 組の偏向電極を形成しており、当該 n 組の偏向電極の内の内側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{a1} 、 V_{a2} 、 \dots 、 V_{an} とし、当該 n 組の偏向電極の内の外側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{b1} 、 V_{b2} 、 \dots 、 V_{bn} としたとき、次の関係を満たしていてもよい。

$$V_{a1} > V_{a2} > \dots > V_{an},$$

$$V_{b1} > V_{b2} > \dots > V_{bn}, \text{ かつ、}$$

$$V_{a1} < V_{b1}, V_{a2} < V_{b2}, \dots, V_{an} < V_{bn}$$

本発明に係る第24のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記n組の偏向電極の相対向面間の間隔は、静電偏向器の入口から出口に至るまで一定でもよい。

本発明に係る第25のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記n組の偏向電極の各組において、その相対向面間の間隔は、それぞれ、出口に向かうに従って広くなっているもよい。

本発明に係る第26のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記n組の偏向電極の各組において、その相対向面間の間隔は、それぞれ、出口に向かうに従って狭くなっているもよい。

本発明に係る第27のイオンビーム装置によれば、上記イオンビーム装置において、前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極の相対向面の半径をそれぞれ r_a および r_b とし、内側および外側の偏向電極に印加される電圧をそれぞれ V_a および V_b とし、静電偏向器内における所望エネルギーのイオンビームの軌道上での電位を V とし、静電偏向器の出口での当該イオンビームの運動エネルギーに対応する電圧を V_0 とし、静電偏向器内における当該イオンビームの設計上の軌道半径を r_0 としたとき、次式またはそれと数学的に等価な関係を実質的に満たしているもよい。

$$V_a = V - 2 (V_0 - V) \log (r_0 / r_a) \text{、かつ、}$$

$$V_b = V + 2 (V_0 - V) \log (r_b / r_0)$$

以上のようにこの発明によれば、一つの静電偏向器によって、イオンビームの平行化とエネルギー分離の両方を行うことができるので、両者を別々の機能要素によって行う場合に比べて、イオンビームのビームライン長を短くすることができる。

更に、上記のように静電偏向器におけるエネルギー分離機能は極めて大きいので、公知の偏向電磁石を用いる場合に比べて、静電偏向器出口からターゲットまでの距離を大幅に短くすることができる。従ってこの観点からも、イオンビームのビームライン長を短くすることができる。

その結果、例えば、イオンビームの発散等による損失を低減してビーム輸送効率の向上を図り、大きなビーム量を確保することが可能になる。この効果は、特に低エネルギーのイオンビームを輸送する場合に顕著になる。

また、ビームライン長を短くすることができるので、装置全体をコンパクトにすることができる。

また、イオンビームの平行化およびエネルギー分離を行う静電偏向器は、磁場を用いる偏向電磁石に比べて、軽量化および低消費電力化が可能である。前記第3のイオンビーム装置によれば、ターゲットへのイオンビームの注入角が0度でない場合でも、ターゲットに入射するイオンビームのビーム進行方向における入射位置が、ターゲット面内において変化せず一定である、という更なる効果を奏する。

前記第8のイオンビーム装置によれば、分割した偏向電極間の隙間から静電偏向器内を効率良く真空排気することができる、という更なる効果を奏する。

前記第9のイオンビーム装置によれば、不所望エネルギーのイオンが偏向電極の相対向面に衝突してスパッタしても、スパッタ粒子はカーボンをスパッタして生じるものであるので、これが万一ターゲットに到達しても、ターゲット表面に作成される半導体デバイスの特性に与える影響が少ない、という更なる効果を奏する。

前記第10のイオンビーム装置によれば、次のような更なる効果を奏する。即ち、所望エネルギーのイオンビームは静電偏向器内において接地電位部付近を通過することになるので、静電偏向器の中で当該イオンビームが加減速されない。また、静電偏向器のすぐ上流側の機器およびすぐ下流側の機器は通常は接地電位であるので、静電偏向器の前後においてもイオンビームが加減速されない。従って、静電偏向器を通してイオンビームのエネルギーが変化しない。

前記第12のイオンビーム装置によれば、中性粒子は走査器において走査されずに直進するので、中性粒子とイオンビームとの分離が容易になる、という更なる効果を奏する。

前記第 13 のイオンビーム装置によれば、加減速器中の電界は、走査器によって走査されたイオンビームの走査位置に拘わらず常に、加減速器に入射するイオンビームの方向に平行に加わるので、走査されたイオンビームを電界によって加速または減速しても、当該電界によってイオンビームは曲げられずイオンビームの方向が変わらない、という更なる効果を奏する。

前記第 14 のイオンビーム装置によれば、分析スリットを別個に設けなくて済むので、分析スリットを別個に設ける場合に比べて、ビームライン長を短くすることができる、という更なる効果を奏する。

前記第 15 のイオンビーム装置によれば、静電偏向器とビームマスクとが協働して、エネルギー分離性能を高めることができる、という更なる効果を奏する。

前記第 16 のイオンビーム装置によれば、静電偏向器とビームマスクとが協働して、エネルギー分離性能をより一層高めることができる、という更なる効果を奏する。

前記第 17 のイオンビーム装置によれば、静電偏向器を出たイオンビームの、走査方向における直線上の走査速度が一定になる、という更なる効果を奏する。

前記第 18 ～ 26 のイオンビーム装置によれば、次のような更なる効果を奏する。即ち、前記静電偏向器において、イオンビームを、偏向しながら減速することができるので、イオンビームの加減速器を別個に設けなくて済む。その結果、加減速器を別個に設ける場合に比べて、ビームライン長をより短くすることができるので、イオンビームの発散等による損失をより低減してビーム輸送効率をより向上させることができ、より大きなビーム量を確保することが容易になる。また、ビームライン長をより短くすることができるので、装置全体をよりコンパクトにすることができる。

特に、イオンビームを減速する場合、加減速器で所望エネルギーまで完全に減速した後に静電偏向器内を通過させると、低エネルギーでのビームラインが長くなって空間電荷効果によるイオンビームの発散が大きくなるのに対して、この発明では、静電偏向器内でイオンビームを偏向しながら徐々に所望エネルギーまで減速するので、低エネルギーでのビームラインは静電偏向器内の途中からとなっ

て短くなり、従って空間電荷効果によるイオンビームの発散を抑制することができる。その結果、低エネルギーで大電流のイオンビームを取り出すことが容易になる。

前記第 19～26 のイオンビーム装置によれば、次のような更なる効果を奏する。即ち、前記静電偏向器において、イオンビームを、偏向しながら加速することができるので、イオンビームの加減速器を別個に設けなくて済む。その結果、加減速器を別個に設ける場合に比べて、ビームライン長をより短くすることができるので、イオンビームの発散等による損失をより低減してビーム輸送効率をより向上させることができ、より大きなビーム量を確保することが容易になる。また、ビームライン長をより短くすることができるので、装置全体をよりコンパクトにすることができる。

前記第 27 のイオンビーム装置によれば、静電偏向器内において、所定のビーム軌道上でのイオンビームの所定の加速または減速をより円滑に行うことができるので、ビーム軌道のより揃ったイオンビームを静電偏向器から取り出すことが可能になる、という更なる効果を奏する。

<図面の簡単な説明>

図 1 は、この発明に係るイオンビーム装置の一実施形態を示す平面図であり、

図 2 は、図 1 のイオンビーム装置を矢印 F 方向に見て部分的に示す正面図であり、イオン源から静電偏向器の出口までを示し、

図 3 は、図 1 中の静電偏向器周りの一例を示す斜視図であり、

図 4 は、トーラスの一例を示す斜視図であり、

図 5 は、図 1 中の走査器と静電偏向器との位置関係を示す図であり、

図 6 は、図 1 中のビームマスクの一例を示す正面図であり、

図 7 は、静電偏向器の他の例を示す断面図であり、

図 8 は、静電偏向器の更に他の例を示す断面図であり、

図 9 は、静電偏向器の更に他の例を示す斜視図であり、

図 10 は、図 9 の静電偏向器に似た静電偏向器の例を示す断面図であり、

図 1 1 は、ターゲットに対するイオンビームの第 1 および第 2 の注入角を示す斜視図であり、

図 1 2 は、図 1 中の偏向電磁石の一例を磁場 4 4 方向に見て示す図であり、

図 1 3 は、図 1 中の偏向電磁石の他の例を磁場 4 4 方向に見て示す図であり、

図 1 4 は、静電偏向器を出たイオンビームの弧状の走査ビーム断面とターゲットの動きの相対関係の一例を示す図であり、

図 1 5 は、走査電圧波形の一例を示す図であり、

図 1 6 は、注入角 ϕ が 0 度でない場合の、静電偏向器を出たイオンビームとターゲットの動きの相対関係の一例を示す図であり、

図 1 7 は、ターゲットに入射するイオンビームの例を示す概略図であり、(A) は X 軸に平行な平行ビームを示し、(B) は X 軸に平行よりも広がった例を示し、(C) は X 軸に平行よりも狭まった例を示し、

図 1 8 は、静電偏向器にイオンビームの加減速機能を持たせる場合の一実施形態を示す図であり、

図 1 9 は、断面円弧状の偏向電極を有する静電偏向器にイオンビームの加減速機能を持たせる場合の原理を説明するための図であり、

図 2 0 は、2 組の断面円弧状の偏向電極を有する静電偏向器にイオンビームの加減速機能を持たせる場合の原理を説明するための図であり、

図 2 1 は、2 組の断面円弧状の偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを減速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 2 2 は、4 組の出口に向かって広がっている偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを減速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 2 3 は、図 2 2 の例における各偏向電極の半径の角度依存性を示す図であり、

図 2 4 は、4 組の出口に向かって狭くなっている偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを加速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 25 は、9 組の断面円弧状の偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを減速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 26 は、9 組の断面円弧状の偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを加速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 27 は、1 組の出口に向かって広がっている偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを減速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 28 は、1 組の出口に向かって狭くなっている偏向電極を有する静電偏向器においてイオンビームを加速する場合のビーム軌道等のシミュレーション結果の一例を示す図であり、

図 29 は、抵抗分割法による偏向電源の一例を示す回路図であり、

図 30 は、多電源法による偏向電源の一例を示す回路図である。

なお、図中の符号、2 はイオン源、4 はイオンビーム、4 a は所望エネルギーのイオンビーム、6 は質量分離電磁石、12 は走査器、16 は走査電源、22 は加減速器、28 は加減速電源、30 は静電偏向器、32、32 a、32 b は偏向電極、33 は相対向面、40 a、40 b は偏向電源、42 は偏向電磁石、46 はビームマスク、50 はターゲット、52 はホルダ、54 は走査機構である。

<発明を実施するための最良の形態>

図 1 は、この発明に係るイオンビーム装置（より具体的にはイオン注入装置）の一実施形態を示す平面図である。図 2 は、図 1 のイオンビーム装置を矢印 F 方向に見て部分的に示す正面図であり、イオン源から静電偏向器の出口までを示す。なお、以下において、イオン源 2 から射出されたイオンビーム 4 の進行経路において、イオン源に近い側を「上流側」、その反対側を「下流側」という。

このイオンビーム装置は、イオンビーム 4 を射出するイオン源 2 と、このイオン源 2 からのイオンビーム 4 が入射され当該イオンビーム 4 から所望質量のイオ

ンビーム 4 を分離して取り出す（即ち質量分離を行う）質量分離電磁石 6 と、この質量分離電磁石 6 からのイオンビーム 4 が入射され当該イオンビーム 4 を、一定の走査面 13（図 3 参照）内で一定の走査中心 P を中心にして走査して取り出す走査器 12 とを備えている。この走査器 12 によるイオンビーム 4 の走査角度を θ とする。

この実施形態では、一点で互いに直交する三つの軸を X 軸、Y 軸および Z 軸としたとき、走査器 12 に入射するイオンビーム 4 は、Z 軸に平行に入射するものであり、走査器 12 は、当該入射されたイオンビーム 4 を Y-Z 平面に平行な前記走査面 13 内で前記走査中心 P を中心にして走査するものである。

図 1 以降の各図中には、イオンビーム 4 の進行方向、各機器の向き等の理解を容易にするため、X 軸、Y 軸および Z 軸を図示している。

イオン源 2 から射出されるイオンビーム 4 は、断面（進行方向に直交する断面）が例えば円形のスポット状をしているが、他の（例えば楕円形や長方形等の）断面形状でも良い。

質量分離電磁石 6 と走査器 12 との間には、必要に応じて、この例のように、イオンビーム 4 の断面形状を整形する四重極レンズ（Q レンズ）8 を設けても良い。

質量分離電磁石 6 の下流側には、通常は、この例のように、質量分離電磁石 6 と協働して、所望質量のイオンビーム 4 を通過させ不所望質量のイオンを阻止する（即ち質量分離を行う）分析スリット 10 が設けられる。この分析スリット 10 は、この例では走査器 12 のすぐ上流側に設けているが、後述する加減速器 22 の入口（最上流側）の電極 24 のすぐ上流側に配置しても良いし、当該入口の電極 24 に分析スリットを兼ねさせても良い。兼ねさせると、分析スリットを別個に設けなくて済むので、分析スリットを別個に設ける場合に比べて、ビームライン長を短くすることができる。

上記イオン源 2 から走査器 12 までの各機器は、この実施形態では、高電圧ボックス 18 内に収納されている。この高電圧ボックス 18 は、図 2 に示すように、接地電位部 21 から支持碍子 20 によって支持されている。この高電圧ボックス

18 およびそれに接続された加減速器 22 の前記入口の電極 24 と接地電位部 21 との間には、直流電源である加減速電源 28 から、加減速電圧 V_A が印加される。加減速電源 28 は、加減速器 22 によってイオンビーム 4 を加速する加速モードの場合は図示例のように高電圧ボックス 18 側を正極側にして接続され、減速する減速モードの場合は図示例とは反対に高電圧ボックス 18 側を負極側にして接続される。加速モードの場合に使用する加減速電源 28 と減速モードの場合に使用する加減速電源 28 とは、互いに同一の電源でも良いし、別の電源でも良い。あるいは、減速モードの場合は、イオン源 2 と大地電位部 21 との間に減速モード専用電源（図示せず）を入れ、これによって、イオンビーム 4 を加減速器 22 で減速させても良い。

走査器 12 は、この実施形態では、互いに平行な一対の平行平板型の走査電極 14 を有する静電型のものであり、両走査電極 14 間には、走査電源 16 から、三角波状または概ね三角波状をした走査電圧 V_s （例えば図 15 参照）が印加される。より具体的には、この例では、高電圧ボックス 18 の電位を基準にしてそれよりも高電圧側および低電圧側に対称に振動する走査電圧 V_s が印加される。即ち、 $\pm V_s$ が印加される。

走査器 12 は、当該走査器 12 に入射するイオンビーム 4 を、図 2、図 3 等に示す例のように、その入射軸（即ち、Z 軸に平行な軸）62 に対して対称に走査するものでも良いし、入射軸 62 に対して片側（Y 軸方向における片側）方向においてのみ走査するものでも良い。後者のように走査するためには、例えば、走査電圧 V_s の中心電位を、高電圧ボックスの電位よりも高い方または低い方に片寄らせて、バイアスをかければ良い。後者のように走査すると、中性粒子は走査器 12 において走査されずに直進するので、中性粒子とイオンビーム 4 との分離が容易になる。

このイオンビーム装置は、更に、走査器 12 からのイオンビーム 4 が入射され当該イオンビーム 4 の内の所望エネルギーのイオンビーム 4a を、前記走査中心 P を中心とする円弧状の偏向領域で、前記走査面 13 に垂直な方向に、即ち X 軸に平行な方向に進むように静電的に 90 度偏向して取り出す静電偏向器 30 と、

イオン注入すべきターゲット（例えば半導体基板）50を保持して当該ターゲット50を、静電偏向器30から取り出されたイオンビーム4aに一定の角度で交差する方向に機械的に往復走査する走査機構54とを備えている。ターゲット50は、この例ではホルダ52に保持される。

走査器12と静電偏向器30との間には、この実施形態のように、走査器12によって走査されたイオンビーム4を静電的に加速または減速する加減速器22を設けても良い。この加減速器22は、イオンビーム4の進行方向に一定の間隔をあけて配置された少なくとも2枚の電極24を有しており、この各電極24は、図3も参照して、前記走査中心Pを中心とする円弧状をしており、かつ、走査されたイオンビーム4の走査方向の幅よりも幅の広いビーム通過穴26を有している。

この加減速器22を構成する各電極24の電位は、この実施形態では、入口の電極24の電位は高電圧ボックス18と同電位であり、出口（最下流側）の電極24の電位は接地電位であり、両者の間の電極24の電位は両者の間の電位である。

上記のような加減速器22を用いれば、加減速器22中の電界は、走査器12によって走査されたイオンビーム4の走査位置に拘わらず常に、加減速器22に入射するイオンビーム4の方向に平行に加わるので、走査されたイオンビーム4を電界によって加速または減速しても、当該電界によってイオンビーム4は曲げられずイオンビーム4の進行方向が変わらない。

上記静電偏向器30について、図3等も参照して更に説明する。

静電偏向器30は、所定の間隔をあけて相対向する一対（一組）の偏向電極32を有している。

静電偏向器30は、前述したように、入射されたイオンビーム4の内の所望エネルギーのイオンビーム4aを90度偏向させてX軸に平行に出射するものであり、走査器12によって走査されかつ静電偏向器30によって偏向されたイオンビーム4の内で所望エネルギーを有するイオンビーム4aの1本のイオンビーム4aの軌道を考えたとき、当該軌道は、直線部の先端に、X軸に平行になるよう

に弧状に90度曲がった弧状部を有しており、静電偏向器30を構成する一対の偏向電極32の相対向面33は、それぞれ、前記1本のイオンビーム4aの軌道を前記走査中心Pを通りX軸に平行な軸60を中心にして前記走査方向に所定角度回転させたときに前記弧状部が描く回転面に沿う、または概ね沿う形状をしている。

各偏向電極32の相対向面33と反対側の面の形状は、特定のものに限定されない。例えば、図1等に示す例のように相対向面33に沿う形状をしていても良いし、それ以外の形状でも良い。なぜなら、イオンビーム4を偏向する電界は、各相対向面33間に形成されるので、相対向面33の形状が重要だからである。

この静電偏向器30におけるイオンビーム4の偏向位置は、走査器12によってどの角度に走査されているイオンビーム4に対しても、走査中心Pから等距離の所である。また、偏向力が働く方向は、各走査イオンビーム4に対して、その走査イオンビーム4の向かう方向を含み、走査面13とは垂直な面内にある。即ち、この静電偏向器30の構成は、より具体的には、その相対向面33の構成は、イオンビーム4の走査角度 θ に対しての対称性（方位角方向の対称性）を有するものである。

静電偏向器30の両偏向電極32の相対向面33間の空間は、イオンビーム4が入射する入口端面36、所望エネルギーのイオンビーム4aを90度偏向する偏向領域34およびイオンビーム4aが出射する出口端面38から成り、入口端面36は、イオンビーム4の走査面13に対して、即ちY-Z平面に対して垂直であり、かつ前記走査中心Pを中心とする円弧状に曲がっている。出口端面38は、Y-Z平面に平行であり、かつ前記走査中心Pを当該出口端面38を含む平面上に投影した点を中心とする円弧状に曲がっている。偏向領域34は、イオンビーム4のどの走査角度 θ においても同じ曲がり方で曲がって、入口端面36と出口端面38との間をつないでいる。

例えば、図1～図3に示す偏向電極30を構成する各偏向電極32の相対向面33は、それぞれ、図4に示すようなトーラス95を、前記走査中心Pを通りX軸に平行なトーラス中心軸96を中心とする円周方向に所定角度だけ切り取り、

かつトーラス 95 の縦断面（ポロイダル断面）98 の外周が形成する円弧を 90 度だけ切り取ってできる、点 e、f、g、h で囲まれる曲面 100 と同一形状またはそれに沿う形状をしている。

静電偏向器 30 を構成する一対の偏向電極 32 間には、外側の偏向電極 32 から内側の偏向電極 32 に向かう電界を形成して、イオンビーム 4 を上記のように偏向させる直流の偏向電圧が偏向電源から印加される。

この場合、偏向電源は、単純に外側の偏向電極 32 に内側の偏向電極 32 よりも高い偏向電圧を印加するもの、例えば後者 32 を接地電位にして前者 32 に正の偏向電圧を印加するものでも良いけれども、この実施形態のように、内側と外側の偏向電極 32 に、接地電位に対して対称の（即ち、絶対値が同じで極性が正負反対の）偏向電圧 $-V_D$ 、 $+V_D$ をそれぞれ印加する偏向電源 40a、40b を設けるのが好ましい。

そのようにすると、両偏向電極 32 の相対向面 33 の中間が接地電位になる。その結果、所望エネルギーのイオンビーム 4a は静電偏向器 30 内において接地電位部付近を通過することになるので、静電偏向器 30 の中で当該イオンビーム 4a が加減速されない。また、静電偏向器 30 のすぐ上流側の機器およびすぐ下流側の機器は通常は接地電位であるので、例えば通常は、前述した加減速器 22 の出口の電極 24 は接地電位であり、ホルダ 52 や後述するビームマスク 46 等も接地電位であるので、静電偏向器 30 の前後においてもイオンビーム 4、4a が加減速されない。従って、静電偏向器 30 を通してもイオンビームのエネルギーが変化しない。

このイオンビーム装置によれば、走査器 12 によって走査されたイオンビーム 4 は、扇状に広がって静電偏向器 30 に入射する。

静電偏向器 30 に入射したイオンビーム 4 の内の所望エネルギーのイオンビーム 4a は、前記走査中心 P を中心とする円弧状の偏向領域 34 で、前記走査面 13 に垂直な方向に進むように静電的に 90 度偏向されて、静電偏向器 30 から取り出される（出射する）。

このようにして静電偏向器 30 から取り出された所望エネルギーのイオンビーム 4 a を構成する 1 本 1 本のイオンビーム 4 a は、互いに平行である。この実施形態では、X 軸に平行な状態で互いに平行である。その様子の例を、図 9、図 11、図 17 (A) 等に示す。これは、一つの面に立てた複数本の垂線が互いに平行であるのと同様に、一つの走査面 13 に垂直に出射する各イオンビーム 4 a は、その走査位置に拘わらず、互いに平行であるからである。このようにして、静電偏向器 30 から出射するイオンビーム 4 a の平行化を行うことができる。

静電偏向器 30 に入射したイオンビーム 4 の内の不所望エネルギーのイオン 4 b は、所望エネルギーのイオンビーム 4 a とは偏向半径（旋回半径）が異なるので、図 1 中に例示するように、所望エネルギーのイオンビーム 4 a から分離される。このようにして、エネルギー汚染物質の除去、即ちエネルギー分離を行うことができる。

しかも、静電偏向器 30 におけるイオンビーム 4 の偏向方向は、走査器 12 におけるイオンビーム 4 の走査方向とは垂直方向であり、特許文献 3 に記載されている技術と違って、走査器 12 によって走査されて広がったエネルギーの異なるイオンビーム同士を同一面内で互いに分離するのではなく異なった面内で互いに分離するので、異エネルギーイオンの分離は容易であり、従ってエネルギー分離機能は非常に大きい。加えて、静電偏向器 30 におけるイオンビーム 4 a の偏向角度が 90 度と大きいので、この観点からも、異エネルギーイオンの分離は容易であり、従ってエネルギー分離機能は非常に大きい。この両者が相俟って、静電偏向器 30 におけるエネルギー分離機能は極めて大きい。

また、静電偏向器 30 の場合は、偏向電磁石の場合と違って、偏向角度を大きくすることは、当該静電偏向器 30 を曲げることで等によって比較的簡単に実現することができるので、しかも偏向角度はイオンビームを構成するイオンの質量 m に依存せず大きな質量 m のイオンを偏向することも容易であるので、偏向角度を 90 度と大きくしても、特許文献 3 に記載されている偏向電磁石が有する前記巨大化等の課題発生を避けることができる。

静電偏向器 30 における偏向角度がイオンの質量 m に依存しないことを説明する。一般的に、平行平板型の偏向電極を用いた静電偏向による偏向角度 Θ は、入射イオンビームのエネルギーを E_B 、そのイオンビームを構成するイオンの電荷を q 、偏向電極間に印加される偏向電圧を V 、偏向経路長を L とすると、次式で表される。

[数 2]

$$\tan \Theta = k V L q / E_B, \quad (k \text{ はイオンの質量に依らない定数})$$

また、円筒面状の偏向電極を用いて、イオンビームの偏向軌道が円を描くような静電偏向のときは、上記数 2 において $\tan \Theta$ を Θ [ラジアン] と置き換えて表現される。

上記式から明らかなように、静電偏向による偏向角度 Θ は、磁場偏向の場合（前記数 1 参照）と違って、イオンビームを構成するイオンの質量 m に依存しない。静電偏向器 30 の場合も同様である。従って、大きな質量 m のイオンに対するエネルギー分離を行う場合でも、質量 m に応じて偏向電圧 V を大きくする必要はないので、偏向電源の容量、消費電力、寸法が巨大化する等の課題は生じない。また、静電偏向器 30 は、磁場を用いる偏向電磁石に比べて、軽量化、低消費電力化および低コスト化が可能である。

上記のように、このイオンビーム装置によれば、一つの静電偏向器 30 によって、イオンビーム 4 の平行化とエネルギー分離の両方を行うことができるので、両者を特許文献 1 または 2 に記載の技術のように別々の機能要素によって行う場合に比べて、イオンビーム 4 のビームライン長を短くすることができる。

更に、上記のように静電偏向器 30 におけるエネルギー分離機能は極めて大きいので、特許文献 3 に記載の技術に比べて、静電偏向器 30 の出口からターゲット 50 までの距離を大幅に短くすることができる。従ってこの観点からも、イオンビーム 4 のビームライン長を短くすることができる。

なお、特許文献 1 に記載の技術では、エネルギー分離性能を高めるために、静電偏向器の出口から相当離れた位置に、所望エネルギーのイオンビームを通し不所望エネルギーのイオンを阻止するビームマスクを設けている。これに対して、

このイオンビーム装置では、上記と同じ目的および同じ作用のビームマスクを設ける場合でも、それを、静電偏向器 30 の出口付近に設けることが可能である。図 1 に示すビームマスク 46 はその一例を示す。これは、前述したように、静電偏向器 30 におけるエネルギー分離機能が極めて大きいからである。従って、ビームマスク 46 を設ける場合でも、静電偏向器 30 からビームマスク 46 までの距離を極めて短くすることができるので、やはり、ビームライン長を短くすることができる。

また、このイオンビーム装置によれば、図 5 を参照して、前記走査中心 P から静電偏向器 30 の入口までの距離 L_1 を比較的小さくすることが可能である。その比較対象として、1992 年に発行された次の文献に記載されている、静電的にイオンビームの平行化を行う技術が挙げられる。

イオン注入技術-92 (ION IMPLANTATION TECHNOLOGY-92), エイ・エム・レイ他 (A. M. Ray et al.), イートン NV-8200P の概観 (Overview of the Eaton NV-8200P), p. 401-404

上記文献に記載の技術では、走査されたイオンビームの平行化のための電極の入口において、イオンビームの走査幅が、イオン注入すべきターゲットの直径に相当する値となっていなければならない。これに対して、この発明に係るイオンビーム装置では、イオンビーム 4 の平行化等のための静電偏向器 30 の出口において、イオンビーム 4a の走査幅がターゲット 50 の直径に相当する値であれば良いことから、イオンビームの走査角度を同じ条件として両技術を比較すれば、上記文献に記載の技術よりも、この発明に係るイオンビーム装置の方が、上記距離 L_1 を短くできることは明らかである。

この発明に係るイオンビーム装置では、図 5 を参照して、前記走査中心 P から静電偏向器 30 の出口 Q までのビームライン長 L_p は、走査器 12 における走査角度を $\pm \theta$ 、静電偏向器 30 における実効的な偏向半径を R、ターゲット 50 の直径を D とすると、次式で表される。なお、図 5 は、図 1 の走査器 12 と静電偏向器 30 とを抽出して拡大して示すものである。

[数 3]

$$\begin{aligned}
 L_p &= L_1 + \pi R / 2 \\
 &= L_2 - R + \pi R / 2 \\
 &= D / (2 \tan \theta) - R + \pi R / 2 \\
 &= D / (2 \tan \theta) + (\pi / 2 - 1) R
 \end{aligned}$$

上記式より、 $D = 300 \text{ mm}$ 、 $\theta = \pm 15^\circ$ 、 $R = 400 \text{ mm}$ を例としてビームライン長 L_p を求めると、 $L_p \approx 788 \text{ mm}$ となる。

以上のように、いずれの公知技術と比較しても、このイオンビーム装置によれば、イオンビーム4のビームライン長を短くすることができる。その結果、例えば、イオンビーム4の発散等による損失を低減してビーム輸送効率の向上を図り、大きなビーム量を確保することが可能になる。この効果は、特に低エネルギーのイオンビーム4を輸送する場合に顕著になる。

また、ビームライン長を短くすることができるので、装置全体をコンパクトにすることができる。

また、走査器12以降では、イオンビーム4の走査角度方向の対称性が維持されているので、走査器12以降の機器構成が容易である。かつ、イオンビーム4の特性が走査角度方向について均一である。前者の理由は、対称性を有する機器は、その設計、加工、配置等が容易だからである。後者の利点は、例えばスポット状のイオンビーム4の断面形状等が走査角度方向によって変化しないことである。

静電偏向器30を出たイオンビーム4aの、その進行方向に垂直な走査ビーム断面5の形状は、即ちY-Z平面での走査ビーム断面5の形状は、図2、図6、図14に示すように、弧状をしている。より具体的には、前記走査中心PをY-Z平面に平行な面上に投影した点 P_1 （図14参照）を中心とする円弧状をしている。なお、上記各図において、走査された1本1本のイオンビーム4aのスポット状の断面の幾つかを小円で示しており、走査されたイオンビーム4aの全体の断面が走査ビーム断面5である。

従って、上記ビームマスク46を設ける場合、そのビーム通過穴48の形状は、図6中に実線で示す例のように、弧状（例えば円弧状）の走査ビーム断面5に相

似形またはほぼ相似形にするのが好ましい。また、走査ビーム断面 5 より幾分大きめにするのが好ましい。そのようにすると、静電偏向器 30 とビームマスク 46 とが協働して、エネルギー分離性能をより一層高めることができる。更に、イオン注入時のターゲット 50 からの脱ガス（アウトガス）の影響（真空度悪化）が静電偏向器 30 に及ぶのをより効率良く抑制して、偏向電極 32 間で放電が発生して静電偏向器 30 の動作が不安定になることをより効率良く防止することもできる。

もっとも、前述したように静電偏向器 30 におけるエネルギー分離性能は極めて高いので、ビームマスク 46 に設けるビーム通過穴 48 の形状は、図 6 中に二点鎖線で示すよう

に、弧状の走査ビーム断面 5 を包含する長方形にしても良い。そのようにすると、ビーム通過穴 48 の形状が単純になる。

静電偏向器 30 内は、即ちその偏向領域 34 は、イオンビーム 4、4a が雰囲気中の分子、粒子と衝突することや前記放電発生を避ける等のために、高真空に維持しておくのが好ましいので、この偏向領域 34 の真空排気を十分に行える真空排気装置を設けるのが好ましい。この偏向領域 34 の真空排気は、図 3 中に矢印 80 または 82 で示すように、イオンビーム 4a の進行方向とは直角の方向に行うのが好ましい。そのようにすると、偏向領域 34 が前記のように曲がっていても、その曲がり方が排気のコンダクタンス低下を招くことが少ないので、偏向領域 34 を効率良く真空排気することができる。

前記静電偏向器 30 に課せられる条件は、その一对の偏向電極 32 の相対向面 33 が前述したようにイオンビーム 4 の走査角度方向についての対称性を持つことと、90度偏向であるということのみであり、それ故に、これらの条件を満足しておれば、両偏向電極 32 の、より具体的にはその相対向面 33 の形状は、前述した例のもの以外に、イオンビーム 4a の進行方向に沿って分割したり、複数の曲面を組み合わせて構成したり、複数の平面と曲面とを組み合わせて構成する等しても良い。

例えば、図 7 は、図 1 ～図 3 に示した両偏向電極 3 2 を、それぞれ、偏向角の増大方向に隙間 7 0 をあけて 2 分割した例である。これよりも多く分割しても良い。また、一方の偏向電極 3 2 のみを分割しても良い。このようにすると、当該隙間 7 0 から、矢印 8 4 または 8 6 に示すように、静電偏向器 3 0 内を、即ちその偏向領域 3 4 を効率良く真空排気することができる。これは、偏向領域 3 4 が前記のように曲がっていても、その曲がり方が排気のコンダクタンス低下を招くことが少ないからである。

図 8 は、両偏向電極 3 2 の相対向面 3 3 の断面形状を楕円にした例である。この例では、Z 軸に沿う方向に長軸を有する楕円であるが、X 軸に沿う方向に長軸を有する楕円でも良い。

図 9 は、両偏向電極 3 2 を、それぞれ、複数の（図示例では三つの）偏向電極片 3 2 d を組み合わせて（接続して）構成した例である。即ち、両偏向電極 3 2 の相対向面 3 3 を、図 3 に示したのと同じ軸 6 0 を中心とする前記回転面に概ね沿う複数の（図示例では三つの）面を組み合わせて（接続して）形成した例である。その断面はほぼ図 1 0 に示すようなものである。各偏向電極片 3 2 d およびその相対向面 3 3 は、上記軸 6 0 を中心軸とする円錐の一部分から成る。

上記いずれの例においても、両偏向電極 3 2 の少なくとも相対向面 3 3 は、それぞれ、カーボン、シリコン、アルミニウムまたはこれらの化合物で形成するのが好ましい。例えば、両偏向電極 3 2 自体をこれらの材質で形成しても良いし、両偏向電極 3 2 の相対向面 3 3 にこれらの材質の膜を被覆しても良い。

両相対向面 3 3 は、不所望エネルギーのイオン 4 b（図 1 参照）が衝突してスパッタされる可能性がある。即ち、当該相対向面 3 3 からそれを構成する物質を含むスパッタ粒子が叩き出される可能性がある。そこで、相対向面 3 3 を上記のような材質で形成しておくこと、このスパッタ粒子が万一ターゲット 5 0 に到達しても、ターゲット 5 0 の表面に作成される半導体デバイスの特性に与える影響が少ない。

ところで、前記数 2 から明らかなように、静電偏向器 3 0 におけるイオンビーム 4 の偏向角度はイオンビーム 4 を構成するイオンの質量 m に依存しないので、

質量 m が異なっているとしても、 q/E_B (E_B はエネルギー、 q は電荷) が同じ値を持つイオンは同じ軌道を描く。通常は、質量 m の異なるイオンについては、走査器 1 2 に入るまでに質量分離電磁石 6 を通過させて所望の質量 m のみのイオンから成るイオンビーム 4 を得るのであるが、ときにより例えば水素原子を多く含むイオンや、同位体を持つイオンをターゲット 5 0 に注入する場合があります、その場合には、質量 m がわずかに異なる有用な (即ち所望の) イオンが複数種類イオンビーム 4 中に存在することになる。

このようなイオンは、例えば、 $B_2H_x^+$ ($x=1, 2, 3, 4, 5, 6$)、 $B_{10}H_y^+$ ($y=1, 2, \dots, 14$)、 Sb_z^+ ($z=121, 123$) である。

このようなイオンを用いて、できるだけ大きなイオンビーム量で注入を行いたい場合は、質量分離電磁石 6 の質量分解能を意図的に低下させることによって、上記のようなイオンを取り出して走査器 1 2 に入射させることができる。そして、静電走査型の走査器 1 2 および上記静電偏向器 3 0 を通して取り出して、ターゲット 5 0 に対してイオン注入を行うイオンビーム 4 a として使用することが可能となる。これは、前述したように、静電走査や静電偏向では、これら質量 m の異なるイオンであっても、その軌道は質量 m の違いによって異なることはなく、ターゲット 5 0 の位置でのビーム走査領域やターゲット 5 0 への入射角度について、全て同様に注入されるからである。

イオンビームの偏向を磁場によって行う場合は、例えば特許文献 2 および 3 に記載されているイオンビームの平行化のための偏向電磁石では、ターゲット上でのイオンビームの走査位置や注入角度は、イオンの質量 m に依存してそれが異なる上記各イオンについては異なった値となるため、注入量や入射角度の不均一性がターゲット 5 0 の面内で発生することになり、イオン注入によって形成される半導体デバイスの特性にばらつきや劣化の問題が生じる可能性を否定できない。

もっとも、走査器 1 2 に関しては、質量がわずかに異なるイオンの上記のような利用に制限があることを抜きにすれば、あるいは適当な走査幅を設定すること等を行えば、磁界によってイオンビーム 4 の走査を行う磁界走査型の走査器 1 2 を用いても良い。

次に、以下における説明の準備のために、ターゲット 50 の表面に入射するイオンビーム 4 a の入射角度、即ち注入角について説明すると、これには二種類ある。これを図 11 を参照して説明すると、図示例は第 1 の注入角 ϕ (ファイ) および第 2 の注入角 ψ (プサイ) は共に 0 度の場合である。ターゲット 50 の表面に立てた垂線 6 4 を考えると、イオンビーム 4 a の走査方向と直交する方向におけるイオンビーム 4 a と垂線 6 4 との成す角が第 1 の注入角 ϕ である。イオンビーム 4 a は Y 軸に沿う方向に走査されるから、Y 軸に平行な軸 6 6 を中心軸にして、ターゲット 50 またはイオンビーム 4 a を相対的に回転させると、注入角 ϕ は変化する。垂線 6 4 a は、注入角 ϕ が 0 度でない場合の例である。

イオンビーム 4 a の走査方向におけるイオンビーム 4 a と垂線 6 4 との成す角が第 2 の注入角 ψ である。Y 軸に直交する Z 軸に平行な軸 6 8 を中心軸にして、ターゲット 50 またはイオンビーム 4 a を相対的に回転させると、注入角 ψ は変化する。垂線 6 4 b は、注入角 ψ が 0 度でない場合の例である。

さて、静電偏向器 30 とターゲット 50 との間には、図 1 に示す実施形態のように、イオンビーム 4 a を磁場 4 4 によって偏向させる偏向電磁石 4 2 を設けても良い。この偏向電磁石 4 2 は、イオンビーム 4 a の経路を挟んで相対向する磁極を有している。その磁場 4 4 の向かう方向に見た平面の例を図 12 および図 13 にそれぞれ示す。

この偏向電磁石 4 2 の入口端では、イオンビーム 4 a は既に平行化されていて、X-Y 平面にほぼ沿うほぼシート状のイオンビームになっているので、この偏向電磁石 4 2 によるイオンビーム 4 a の偏向は、このシート面とほぼ同一の面内で行われ、かつ、走査された各イオンビーム 4 a について全て同じ角度で偏向が行われるようにするのが好ましい。このような偏向電磁石 4 2 の磁極面の形状は、概ね長方形となる。

このような偏向電磁石 4 2 を設けることによって、例えば、(a) 第 2 の注入角 ψ の調整 (図 12 参照)、(b) イオンビーム 4 a の走査幅 W の拡大 (図 13 参照) または縮小 (図 12 参照) のための調整、(c) ターゲット 50 の近傍と

静電偏向器 30 との間でイオンビーム 4 a 中の電子やイオンビーム 4 a 以外のイオンの移動を防止すること、等を行うことができる。

上記 (a) の注入角 ϕ の調整に関して説明すると、例えば、このイオンビーム装置の機械的組立精度が不十分で、ターゲット 50 が元々正しく方位されていない状態に組み立てられているような場合、偏向電磁石 42 によってこの注入角 ϕ を調整して基準値（通常は 0 度）に合わせることを簡単に行うことができる。

上記 (b) の走査幅 W の調整に関して説明すると、偏向電磁石 42 の配置および偏向電磁石 42 でのイオンビーム 4 a の偏向角度を適度にとることによって、入射イオンビーム 4 a の走査幅を W_1 、出射イオンビーム 4 a の走査幅を W_2 としたとき、図 13 に示す例のように $W_1 < W_2$ に拡大することもできるし、図 12 に示す例のように $W_1 > W_2$ に縮小することもできる。走査幅 W を拡大する場合を例にとると、ターゲット 50 の寸法の拡大への対応に際して、この偏向電磁石 42 以外の部分に変更を加えることなく、容易に対応することができる。

上記 (c) の作用に関して説明すると、仮に、ターゲット 50 と静電偏向器 30 との間で電子やイオンビーム 4 a 以外のイオンの移動があると、イオンビーム 4 a のビーム量の計測に誤差を生じたり、ターゲット 50 への金属コンタミネーションの増大やパーティクルの付着等の不具合が生じるけれども、上記電子やイオンのエネルギーはイオンビーム 4 a に比べて十分に小さいので、偏向電磁石 42 による小さな偏向磁場強度で上記電子やイオンを大きく偏向させてイオンビーム 4 a から大きく分離することができるので、上記不具合発生を防止することができる。

静電偏向器 30 を出た走査されたイオンビーム 4 a の全体の走査ビーム断面 5 は、前述したように、円弧状をしている。例えば図 14 参照。この走査ビーム断面 5 に対して、ターゲット 50 を、その円弧の中心 P_1 から半径方向に機械的に往復走査（往復運動）させることによって、ターゲット 50 をイオンビーム 4 a に対して横切らせて（交差させて）、ターゲットの全面にイオンビーム 4 a を照射してイオン注入を行うことができる。なお、図 14 は、静電偏向器 30 から出射するイオンビーム 4 a を図 2 と同じ方向から見て示すものである。

図14では、イオンビーム4aは紙面（即ち、Y-Z平面に平行な面）に垂直に表方向に出射しており、ターゲット50に垂直にイオンビーム4aを入射させる場合（即ち前記注入角 ϕ および ϕ が共に0度の場合）であり、従ってターゲット50の表面は紙面に平行であり、かつターゲット50の往復走査の方向も紙面に平行の場合の例を示すものであるが、ターゲット50の往復走査の方向とイオンビーム4aの走査方向との関係は以下のとおりである。

即ち、ターゲット50の中心が、円弧状の走査ビーム断面5の円弧の中心 P_1 を通るかつZ軸に平行な直線72上を往復運動するようにターゲット50を往復走査するのであって、しかもこの往復走査によって、直径Dのターゲット50が、走査ビーム断面5のY軸に平行な方向の走査幅 W_s をはみ出ることがないように往復走査する。その機械的な走査幅を W_M とする。上記中心 P_1 から走査ビーム断面5の中心までの半径を L_2 とする。この半径 L_2 は、図5に示した距離 L_2 と同じである。

図14の構成において、ターゲット50の面内に均一にイオン注入を行う条件を考察する。イオンビーム4aが走査角度 θ のときのY軸に平行な方向のイオンビーム4aの位置（即ち直線72からの距離）は、 $L_2 \sin \theta$ である。従って、Y軸に平行な方向のイオンビーム4aの移動速度 v_y は次式で表される。

[数4]

$$\begin{aligned} v_y &= L_2 \cdot \cos \theta \cdot d\theta / dt \\ &= L_2 \cdot \cos \theta \cdot \omega, \quad (\omega \text{ はイオンビーム走査の角速度}) \end{aligned}$$

平行平板型の走査電極による静電走査の場合には（図1および図2に示す走査器12もそうである）、その走査電圧を時間的に一定の増加率で走査するとき、そのイオンビームの走査幅 y は次式で表され、時間 t に比例する。

[数5]

$$y = k \cdot \tan \theta(t) = st, \quad (k, s \text{ は定数、} t \text{ は時間})$$

従って、平行平板型の走査電極のみによる走査されたイオンビームのY軸に平行な方向の移動速度 v_Y は、 $v_Y = dy / dt = s$ (一定) となる。これと上記数5とから次式が得られる。

[数6]

$$k \cdot \sec^2 \theta(t) \cdot \omega = dy / dt = s \text{ (一定)}$$

この数6と上記数4とを用いて、静電偏向器30を出た後のイオンビーム4aのY軸に平行な方向の移動速度 v_Y を、次式のように表すことができる。

[数7]

$$v_Y = L_2 \cdot \cos^3 \theta(t) \cdot s / k$$

この数7で表される移動速度 v_Y は、時間的に一定の値ではない。即ち、 $\tan \theta$ が時間比例のときは、Y軸に平行な方向のイオンビーム4aの位置は時間比例とはならず、Y軸に平行な方向のイオンビーム4aの移動速度 v_Y は一定にならないのである。逆に、この移動速度 v_Y を一定にするには、 $\sin \theta = ct$ (c は定数、 t は時間) とすれば良い。これを $\tan \theta$ で見ると、次式とすれば良い。

[数8]

$$\tan \theta = \sin \theta / (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} = ct / (1 - c^2 t^2)^{1/2}$$

$\tan \theta$ は、図1および図2に示したような平行平板型の走査電極14間に印加する走査電圧 V_s に比例するので、結局、この走査電圧 V_s を次式のように時間変化させれば良いことになる。

[数9]

$$V_s = ct / (1 - c^2 t^2)^{1/2} \text{、} (c \text{ は定数、} t \text{ は時間})$$

この走査電圧 V_s の時間変化の様子(即ち波形)を図15中に実線92で示す。但し誇張して図示している。参考までに、単なる三角波形を破線94で示す。

従って、前記走査電源16から、走査器12を構成する一対の互いに平行な走査電極14間に、上記数9で表される走査電圧 V_s を印加することによって、静電偏向器30を出たイオンビーム4aの走査方向における直線上の走査速度、即ちY軸に平行な方向における走査速度が一定になる。

これと、ターゲット50を走査機構54によって、Z軸に平行な方向に一定の走査速度で機械的に往復走査することとを併用することによって、ターゲット50の全面において均一なイオン注入量分布を得ることができる。

以上は、第1および第2の注入角 ϕ および ϕ が0度（即ち垂直ビーム入射）の場合についてであるが、第1の注入角 ϕ が0度でない場合（即ち角度注入の場合）の例を図16に示す。この図は、ターゲット50周りを図1と同じ方向から見て示すものである。この図16において、前記走査機構54によって、注入角 ϕ を一定に保ってターゲット50を往復走査するには、（a）ターゲット50を矢印86に示すように、ターゲット50の表面に平行に位置A-B間で往復運動させる場合と、（b）ターゲット50を、矢印88に示すように、Z軸に平行な前記（図14参照）軸72に平行に位置A-C間で往復運動させる場合とがある。この（a）、（b）いずれの方向にターゲット50を走査しても、ターゲット50の表面に対するイオンビーム4aの注入角 ϕ は一定である。

上記（a）の場合は、ターゲット50へのイオンビーム4aの入射位置は、イオンビーム4aの進行方向、即ちX軸に平行な方向において、ターゲット50の面内で変化せず一定である。つまり、ターゲット50の全ての面内において、上記軸72から一定の距離 L_4 の位置で入射し、従って、仮にイオンビーム4aの状態（例えば断面寸法）がその進行方向において変化するようなことがあったとしても、イオンビーム4aをターゲット50の全面に同一条件で照射してイオン注入を行うことができる。しかし、ターゲット50の機械的な往復走査幅は、上記（b）の場合よりも $1/\cos\phi$ だけ大きくなる。

一方、上記（b）の場合は、ターゲット50へのイオンビーム4aの入射位置は、X軸に平行な方向において、ターゲット50の面内で変化する。即ち、ターゲット50が位置AからCへ走査された場合を考えると、イオンビーム4aは、ターゲット50の表面の一端部50aから中央部50bを経て他端部50cへと照射され、ターゲット50の面内において距離 L_3 だけ変化（前後）する。従って、上記（a）の場合とは長所と短所とが逆になる。

しかし、(a)、(b)いずれの場合でも、ターゲット50の面内における良好な注入均一性を確保するために必要な走査電圧 V_s の時間変化は、前記数9に基づいて達成することができる。

このイオンビーム照射装置において、ターゲット50に対する注入均一性の測定と、その測定情報に基づくイオンビーム4の走査波形等の整形手法については、例えば、特許第2969788号公報に記載されている技術を利用することが可能である。

これを図1を参照して簡単に説明すると、ターゲット50を保持するホルダ52の上流側および下流側に、Y軸に沿う方向に走査されたイオンビーム4aを受け取ることができる、走査方向に（即ちY軸に沿う方向に）多点の多点ファラデー列56および58をそれぞれ設けておく。下流側の多点ファラデー列58はイオンビーム4aのビームライン上に固定しておいても良いが、上流側の多点ファラデー列56は、矢印78に示すように移動させて、測定時にのみイオンビーム4aのビームライン上に移動させる。

上記二つの多点ファラデー列56および58から得られる、走査されたイオンビーム4aの走査方向のビーム電流量（ビーム電流の時間積分値）の分布やビームの平行性についての情報に基づいて、それらが良好なものとなるように、走査器12に供給する走査電圧 V_s の波形や静電偏向器30に供給する偏向電圧 V_d の大きさの調整を行えば良い。即ち、ビーム電流量が他よりも多い所では、その位置に対応する部分の走査電圧 V_s をゆっくり変化させ、他よりも少ない所では速く変化させるようにすれば良い。

ターゲット50に入射するイオンビーム4aの平行性については、図17を参照して、偏向電圧 V_d が適切なときは同図(A)に示すようにX軸に平行な平行ビームとなり、偏向電圧 V_d が不足して偏向角度が90度よりも小さいときは同図(B)に示すようにX軸に平行よりも広がったビームとなり、偏向電圧 V_d が過大で偏向角度が90度よりも大きいときは同図(C)に示すようにX軸に平行よりも狭まったビームとなる。従って、上記二つの多点ファラデー列56および58からの情報に基づいて、図17(B)または(C)の状態になっていること

が測定されたら、その各々の程度に応じて偏向電圧 V_D を大きくしたり小さくしたりすれば良い。

この発明に係るイオンビーム装置（より具体的にはイオン注入装置）の仕様の一例を示すと次のとおりである。

X-Z平面の方向：水平

Y-Z平面の方向：垂直

走査器12へのイオンビームの入射方向：Z軸に平行

ターゲット50に入射するイオンビーム4aのエネルギー：1 keV～300 keV

イオンビーム4aを構成するイオンの質量 m ：10 AMU～250 AMU

イオン源2からのイオンビーム4の引出し電圧：10 kV～50 kV

質量分離電磁石6：設置している。

分析スリット10：走査器12のすぐ上流側に設置。そのスリット幅を可変にして、質量分解能の調整が可能（質量分解能の可変範囲は、 $m/\Delta m = 10 \sim 100$ ）。

静電型の走査器12に印加する走査電圧 V_s ：最大で±20 kV

同走査器12での走査角度 θ ：最大で±20度

加減速器22：設置している。

加減速電圧 V_A ：0～250 kV

偏向電圧± V_D ：最大で±100 kV

静電偏向器30の偏向電極32の材質：カーボン

偏向電極32の相対向面の33の形状：トーラス面の一部

静電偏向器30での偏向半径 R ：最大で1000 mm

距離 L_1 （図5参照）：最大で1000 mm

静電偏向器30出口からターゲット50間の距離：最大で500 mm（偏向電磁石42を設けない場合）

ビームマスク46のビーム通過穴48の形状：円弧状

注入時のホルダ52の往復走査方向：水平

角度注入：可能。即ち、ホルダ 5 2 を軸 6 6（図 1 1 参照）の周りに回転させて注入角 ϕ を設定可能。

ホルダ 5 2 の往復走査方向：ターゲット 5 0 の表面に平行

多点ファラデー列 5 6 および 5 8：設置している。これらからの測定情報に基づいて、走査電圧 V_s および偏向電圧 V_D の調整が可能。

次に、静電偏向器 3 0 に、前記機能（即ち、イオンビームの平行化およびエネルギー分離の機能）に加えて、イオンビームを加速または減速する機能を持たせることができる実施形態を、前記各実施形態との相違点を主体にして説明する。なお、以下においては、イオンビームの加減速を主体としており、エネルギー分離の作用については前述したとおりであるので、イオンビームの符号は 4 で代表している。

図 1 8 は、静電偏向器にイオンビームの加減速機能を持たせる場合の一実施形態を示す図である。この実施形態では、静電偏向器 3 0 は、間隔をあけて相対向する内側の偏向電極 3 2 a および外側の偏向電極 3 2 b を有している。この内外の偏向電極 3 2 a および 3 2 b は、それぞれ、偏向角の増大方向に n 個（ n は 2 以上の整数）に分割されていて n 組の偏向電極を形成している。即ち、内側の偏向電極 3 2 a₁ とそれに対応する外側の偏向電極 3 2 b₁ とで 1 組の偏向電極を形成しており、内側の偏向電極 3 2 a₂ とそれに対応する外側の偏向電極 3 2 b₂ とで 1 組の偏向電極を形成しており、以下同様であり、このような偏向電極の組が図 1 8 では、図示の都合上で 4 組（即ち $n = 4$ ）としているが、これに限られるものではない。

この n 組の偏向電極の相対向面 3 3 間の間隔は、この実施形態では、静電偏向器 3 0 の入口から出口に至るまで一定である。このような偏向電極の形状を、以下において、断面円弧状の偏向電極と簡略化して呼ぶ場合がある。

この静電偏向器 3 0 の入口の電位を V_1 、出口の電位を V_2 とすると、イオンビーム 4 を前記のように偏向しながら減速するときは数 1 0 の関係を満たすものにし、加速するときは数 1 1 の関係を満たすものにする。

[数 1 0]

$$V_1 < V_2$$

[数 1 1]

$$V_1 > V_2$$

前記 n 組の偏向電極の内の内側の各偏向電極 $32a_1 \sim 32a_n$ には、第 1 の (内側用の) 偏向電源 $40a$ から、入口側からそれぞれ、電圧 $V_{a1} \sim V_{an}$ が印加される。
 n 組の偏向電極の内の外側の各偏向電極 $32b_1 \sim 32b_n$ には、第 2 の (外側用の) 偏向電源 $40b$ から、入口側からそれぞれ、電圧 $V_{b1} \sim V_{bn}$ が印加される。両偏向電源 $40a$ 、 $40b$ は、それぞれ、1 台の電源で構成しても良いし、複数台の電源で構成しても良い。

より具体例を示すと、内外の各偏向電極 $32a_1 \sim 32a_n$ 、 $32b_1 \sim 32b_n$ に各電圧 $V_{a1} \sim V_{bn}$ をそれぞれ印加する偏向電源 $40a$ 、 $40b$ の例として、(1) 抵抗分割法、または、(2) 多電源法によるものを用いることができる。これを以下に説明する。

(1) 抵抗分割法による偏向電源

この回路図の一例を図 29 に示す。この偏向電源 $40a$ 、 $40b$ は、内外の偏向電極 $32a_1 \sim 32a_n$ 、 $32b_1 \sim 32b_n$ に印加する最大電圧範囲に対して、その最大電圧を供給することができる電源 (図示例では偏向兼加速用電源 112 および偏向兼減速用電源 114) をそれぞれ設け、これらの電源からの出力電圧を複数の可変抵抗器 116 でそれぞれ分割して出力することによって、イオンビームの条件に対して所望の電圧 $V_{a1} \sim V_{an}$ 、 $V_{b1} \sim V_{bn}$ を出力することができる。
 内外の偏向電極に印加する電圧範囲が正、負にまたがる場合は、図示例のように正、負に対応した二つの電源 112 、 114 をそれぞれ設ければ良い。加速モードまたは減速モードのいずれか一方のみで使用する場合は、上記偏向兼加速用電源 112 または偏向兼減速用電源 114 のいずれかのみを設ければ良く、
 両モードを切り換えて使用する場合は、図示例のように、上記偏向兼加速用電源 112 および偏向兼減速用電源 114 の両方を設けると共に、切換スイッチ 118 を設けて、加速モードまたは減速モードに応じた電圧を切り換えて出力する

ようにすれば良い。この抵抗分割法は、電源数を少なくすることができる利点がある。

(2) 多電源法による偏向電源

この回路図の一例を図30に示す。この偏向電源40a、40bは、各偏向電極32a₁～32a_n、32b₁～32b_nに対応して、また加速モード、減速モードに対応して、直列に接続した複数の電源（図示例では偏向兼加速用電源112および偏向兼減速用電源114）を用いるものである。内外の偏向電極32a₁～32a_n、32b₁～32b_nに印加する電圧V_{a1}～V_{an}、V_{b1}～V_{bn}の範囲が正、負にまたがる場合は、一部の電源に正または負の電圧の出力が可能なものを用いれば良い。加速モードと減速モードとの切り換えには、上記(1)の場合と同様に、複数の切換スイッチ118を設けておけば良い。なお、この(2)の方法の場合、全ての偏向電極32a₁～32a_n、32b₁～32b_nに電源を設けるのは不経済であるので、上記(1)の方法を併用して抵抗分割で一部分を置き換えても良い。また、実際には、数多くの電源を個別に設けるのは困難なことが多いので、一つにまとめた電源から多数の電圧を供給するようにするのが好ましい。

上記各電圧は、イオンビーム4を当該静電偏向器30で減速するときは、次式の関係を満たすものにする。

[数12]

$$V_{a1} < V_{a2} < \dots < V_{an}$$

$$V_{b1} < V_{b2} < \dots < V_{bn}$$

$$V_{a1} < V_{b1}, V_{a2} < V_{b2}, \dots, V_{an} < V_{bn}$$

上記各電圧は、イオンビーム4を当該静電偏向器30で加速するときは、次式の関係を満たすものにする。

[数13]

$$V_{a1} > V_{a2} > \dots > V_{an}$$

$$V_{b1} > V_{b2} > \dots > V_{bn}$$

$$V_{a1} < V_{b1}, V_{a2} < V_{b2}, \dots, V_{an} < V_{bn}$$

上記数 1 0 および数 1 2 の関係を満たすことによって、静電偏向器 3 0 において、イオンビーム 4 を、前記のように偏向しながら、徐々に減速することができる。また、上記数 1 1 および数 1 3 の関係を満たすことによって、静電偏向器 3 0 において、イオンビーム 4 を、前記のように偏向しながら徐々に加速することができる。

このように、この実施形態では、静電偏向器 3 0 において、イオンビーム 4 を、偏向しながら減速または加速することができるので、前述したような加減速器 2 2 を別個に設けなくて済む。そのために、図 1 8 の実施形態では加減速器 2 2 を設けていない。その結果、加減速器を別個に設ける場合に比べて、ビームライン長をより短くすることができるので、イオンビーム 4 の発散等による損失をより低減してビーム輸送効率をより向上させることができ、より大きなビーム量を確保することが容易になる。また、ビームライン長をより短くすることができるので、装置全体をよりコンパクトにすることができる。

特に、イオンビーム 4 を減速する場合、加減速器 2 2 を設けてそれで所望エネルギーまで完全に減速した後に静電偏向器 3 0 内を通過させると、低エネルギーでのビームラインが長くなって空間電荷効果によるイオンビーム 4 の発散が大きくなるのに対して、この実施形態では、静電偏向器 3 0 内でイオンビーム 4 を偏向しながら徐々に所望エネルギーまで減速するので、低エネルギーでのビームラインは静電偏向器 3 0 内の途中からとなって短くなり、従って空間電荷効果によるイオンビーム 4 の発散を抑制することができる。その結果、低エネルギーで大電流のイオンビーム 4 を取り出すことが容易になる。

なお、この実施形態の静電偏向器 3 0 は、上記のようにイオンビーム 4 を減速することもできるし、加速することもできる。また、加減速の必要がなければ、前述したような偏向だけを行うこともできる。その場合は、前記 $V_1 = V_2$ とし、かつ次式の関係を満たすようにすれば良い。

[数 1 4]

$$V_a = V_{a1} = V_{a2} = \dots = V_{an}$$

$$V_b = V_{b1} = V_{b2} = \dots = V_{bn}$$

$$V_a < V_b$$

走査器 12 と静電偏向器 30 との間には、より具体的には静電偏向器 30 の入口の上流側付近には、図 18 中に二点鎖線で示すように、必要に応じて、静電偏向器 30 に入射するイオンビーム 4 の方向調整や整形等を行う、例えば X 方向の方向調整や X 方向の厚さ調整を行うレンズ系 110 を設けても良い。このレンズ系 110 は、例えば静電レンズ、より具体例を挙げればユニポテンシャルレンズである。このレンズ系 110 のビーム通過穴は、図示しないけれども、前記加減速器 22 のビーム通過穴 26 と同様の形状にするのが好ましい。

次に、静電偏向器 30 によって、イオンビーム 4 を偏向しながら減速または加速する場合の原理や、この加減速を円滑に行うことができる条件（電極の形状、印加電圧等）等について詳述する。

(1) 静電偏向器 30 が断面円弧状の偏向電極を有する場合

(1-1) 90 度偏向のみで加減速を行わない場合

この場合を、図 19 を参照して説明する。内側の偏向電極 32a の半径（具体的には、その相対向面 33 の半径。以下同様）を r_a 、外側の偏向電極 32b の半径（具体的には、その相対向面 33 の半径。以下同様）を r_b 、イオンビーム 4（より具体的には所望エネルギーのイオンビーム）の軌道半径を r 、内外の偏向電極 32a、32b に印加される電圧をそれぞれ V_a 、 V_b とする。90 度偏向を行うので $V_a < V_b$ である。静電偏向器 30 の入口の電位を V_1 、出口の電位を V_2 とすると、この場合は加減速を行わないので $V_1 = V_2 = 0$ [V] とする。

この場合の電場 E は次式で与えられる。log は自然対数である。r は、偏向電極 32a、32b 間の任意の点の半径である。

[数 15]

$$E = (V_b - V_a) / r \cdot \log(r_b / r_a)$$

上記半径 r の点の電位 V は、数 15 を積分して、次式で与えられる。ここで $r = r_a$ で $V = V_a$ 、 $r = r_b$ で $V = V_b$ である。

[数 16]

$$V = \{ (V_b - V_a) / \log (r_b / r_a) \} \log (r / r_a) + V_a$$

イオンビーム 4 の軌道が半径 r の円軌道を取るためには、イオンビーム 4 を構成するイオンの電荷を q 、ビーム速度を v とすると、半径 r 方向の釣合いの条件より、次式が成立する。

[数 17]

$$q E = m v^2 / r$$

イオンビーム 4 の運動エネルギーに対応した加速電圧を V_m とすると、次式が成立する。

[数 18]

$$m v^2 / 2 = q V_m$$

数 17 および数 18 より、 $E = 2 V_m / r$ となり、これを数 15 に入れると、次式が得られる。

[数 19]

$$V_b - V_a = 2 V_m \log (r_b / r_a)$$

つまり、半径 r_a と半径 r_b との比の対数の 2 倍に、イオンビーム 4 の運動エネルギーに対応した加速電圧 V_m を掛けたものが、内外の偏向電極 32a、32b 間の電位差になる。通常、加減速がない場合は、前述したように電圧 V_b を $+V_D$ 、電圧 V_a を $-V_D$ に取り、イオンビーム 4 の軌道上での電位が 0 V になるように決められる。このとき、数 19 から数 20 が得られる。

[数 20]

$$V_D = V_m \log (r_b / r_a)$$

加減速がある場合は、平行平板のときと同様にバイアス電圧 V_{bias} を考慮して、次式のような形で扱われることが多い。このバイアス電圧 V_{bias} は加減速に用いられる。

[数 21]

$$V_a = -V_D + V_{bias}, \quad V_b = V_D + V_{bias}$$

(1-2) 90 度偏向および加減速を行う場合

この場合を、図 20 を参照して説明する。ここでは、偏向電極は 2 組としている。図 19 と共通する部分の符号は、大部分を省略している。

一例として、静電偏向器 30 の入口のエネルギーが 20 keV のイオンビーム 4 を 15 keV だけ減速して、出口で 5 keV にまで減速する場合を考える。この場合、静電偏向器 30 の入口の電位 V_1 を -1.5 kV、出口の電位 V_2 を 0 V とする。出口でのイオンビーム 4 の運動エネルギー qV_0 に対応する電圧 V_0 は 5 kV である。

内側の偏向電極 32a₁、32a₂ の半径は r_a で変わらないものとする。外側の偏向電極 32b₁、32b₂ の半径も r_b で変わらないものとする。簡単のために、 $K_1 = \log(r_b / r_a)$ と置く。

静電偏向器 30 の入口でのイオンビーム 4 の運動エネルギーは qV_{m1} [eV] である。そこで、数 20 より次式が得られる。

[数 22]

$$V_{D1} = K_1 (V_0 - V_1) = K_1 V_{m1}$$

また、数 21 における V_{bias} を V_1 とすることにより、入口側の偏向電極 32a₁、32b₁ の電圧 V_{a1} 、 V_{b1} は次式となる。

[数 23]

$$V_{a1} = -V_{D1} + V_1$$

$$V_{b1} = V_{D1} + V_1$$

同様に、静電偏向器 30 の出口でのイオンビーム 4 の運動エネルギーは qV_{m2} [eV] である。上記と同様にして、数 24 が得られる。また、出口側の偏向電極 32a₂、32b₂ の電圧 V_{a2} 、 V_{b2} は数 25 となる。

[数 24]

$$V_{D2} = K_1 (V_0 - V_2) = K_1 V_{m2}$$

[数 25]

$$V_{a2} = -V_{D2} + V_2$$

$$V_{b2} = V_{D2} + V_2$$

内側の偏向電極 3 2 a₁、3 2 a₂ 同士間の電位差 V_{in} は、数 2 3 および数 2 5 より、次式となる。

[数 2 6]

$$V_{in} = V_{a2} - V_{a1} = (1 + K_1) (V_2 - V_1)$$

同様に外側の偏向電極 3 2 b₁、3 2 b₂ 同士間の電位差 V_{out} は、前記数 2 3 および数 2 5 より、次式となる。

[数 2 7]

$$V_{out} = V_{b2} - V_{b1} = (1 - K_1) (V_2 - V_1)$$

以上から、例えば $r_a = 0.35$ [m]、 $r_b = 0.45$ [m] の場合は $K_1 = 0.251$ となり、かつ前記のように $V_1 = -1.5$ [kV]、 $V_2 = 0$ [V] であるので、 $V_{in} = 1.877$ [kV]、 $V_{out} = 1.123$ [kV] となる。即ち、 V_{out} よりも V_{in} の方が大きく、両者の差は、減速電圧（即ち V_2 と V_1 との差）が大きくなるほど大きくなるので、隣り合う偏向電極 3 2 a₁ と 3 2 a₂ との間での電場が大きくなり、注意しないと、イオンビーム 4 の軌道を大きく乱す原因になる。平行平板電極であれば、 $K_1 = 0$ でこのようなことは起こらない。

上記電場の乱れは、隣り合う偏向電極間の間隔を広げることである程度緩和されるが、広げ過ぎると電場 E が弱くなり、イオンビーム 4 を偏向させにくくなるので、注意を要する。

上記図 2 0 の原理に従って、ビーム軌道等をシミュレーションした結果の一例を図 2 1 に示す。

ここで、図 2 1 ～ 図 2 8 のシミュレーションに共通する事項を予め説明しておく、このシミュレーションは 2 次元解析であり、イオンビーム 4 を構成するイオンの質量数は 11、イオンビーム 4 のビーム電流密度は 2.5 mA/m とした（分母が m^2 でないのは、ここでは 2 次元解析であり、紙面の表裏方向の奥行 1 m についての電流密度だからである）。静電偏向器 3 0 の入口および出口でのイオンビーム 4 のエネルギーは各図中に示している。内側の偏向電極 3 2 a と外側の偏向電極 3 2 b とは、添字 1、2・・・の同じものがそれぞれ組を成している。静電偏向器 3 0 の入口付近および出口付近を囲む太い実線 1 0 2 および 1 0 4 は、

シミュレーションの境界条件を定めるためのものであり、ビームラインの壁面を模擬したものである（但し、これは、実際の装置のビームラインの形状が図示のようなものであることを意味するものではない）。それらの電位を括弧内に示している。これらの電位が、静電偏向器 30 の入口および出口の電位 V_1 および V_2 にそれぞれ相当する。静電偏向器 30 の出口側の電位は通常は 0 V であるので、このシミュレーションでもそのようにしている。図 21 中の太い実線 103 も、上記と同様に境界条件を定めるためのものである。等電位面（ここでは 2 次元解析だから等電位線とも言える）を符号 106 で示している。二つの等電位面 106 間の電位差は、各図中に ΔV で示している。電位 0 V の等電位面には 0 V を付している。

図 21 は、2 組の断面円弧状の偏向電極 32 a₁、32 a₂、32 b₁、32 b₂ を有する静電偏向器 30 において、イオンビーム 4 をエネルギー 20 keV から 5 keV へと減速する場合の例である。勿論、イオンビーム 4 を 90 度偏向させる（これは、全ての例について共通の事項であるので、以下では言及を省略する）。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

$$32 a_1 : -20 \text{ kV}, \quad 32 b_1 : -9.9 \text{ kV}$$

$$32 a_2 : -1.4 \text{ kV}, \quad 32 b_2 : 1.4 \text{ kV}$$

この図 21 の例では、前述した隣り合う偏向電極間の間隔および各偏向電極に印加する電圧に注意したので、イオンビーム 4 の軌道の乱れを比較的小さいものに抑えることができている。

(2) 静電偏向器 30 においてイオンビーム 4 の加減速をより円滑に行う方法

イオンビーム 4 を静電偏向器 30 内で急激に減速すると、そこに空間電荷が集中し、イオンビームの発散が大きくなる。これを避けるためには、イオンビーム 4 を緩やかに減速することが望ましい。加速の場合も、程度の差はあれ、イオンビーム 4 を緩やかに加速することが望ましいのに変わりはない。

再び図 19 を参照して、ここでは、一例として、静電偏向器 30 内におけるイオンビーム 4 の軌道上での任意の角度 β での電位 V を、次式のように一次式で変化させることを考える（但し、他の適度に緩やかな関数でも良い）。角度 β は、

ここでは、入射イオンビーム 4 に平行な線 108（換言すれば前記 Z 軸）に対する角度であり、静電偏向器 30 の入口の開始角 β_{start} が 90 度、出口の最終角 β_{end} が 180 度である。開始角 β_{start} で $V = V_1$ 、最終角 β_{end} で $V = V_2$ に変化するように設定する。

[数 28]

$$V = \{ (V_2 - V_1) / (\beta_{\text{end}} - \beta_{\text{start}}) \} \cdot (\beta - \beta_{\text{start}}) + V_1$$

加減速中のイオンビーム 4 の運動エネルギーは次式で与えられる。ここで、前述したように、 V_m は運動エネルギーに対応した電圧、 V_o は静電偏向器 30 の出口での運動エネルギーに対応する電圧である。

[数 29]

$$m v^2 / 2 = q V_m = q (V_o - V)$$

一方、静電偏向器 30 内の半径 r の点の電位 V は、前記数 16 より与えられる。もう一度書けば次のとおりである。

[数 30]

$$V = \{ (V_b - V_a) / \log (r_b / r_a) \} \log (r / r_a) + V_a$$

そこで、この数 30 と前記数 28 とを等しいとおくと、望むビーム軌道上の電位を、内外の偏向電極 32a、32b に印加する電圧 V_a および V_b で設定することができる。数 30 を変形すると次式が得られる。

[数 31]

$$\log (r / r_a) = \{ (V - V_a) / (V_b - V_a) \} \log (r_b / r_a)$$

一方、前記数 19 と数 29 より、内外の偏向電極 32a、32b 間の電場の条件は次式で与えられる。

[数 32]

$$\log (r_b / r_a) = (V_b - V_a) / 2 (V_o - V)$$

数 31 と数 32 より、静電偏向器 30 内の任意の半径 r での電位の条件は、次の数 33 または数 34 で与えられる。

[数 33]

$$\log (r / r_a) = (V - V_a) / 2 (V_o - V)$$

[数 3 4]

$$\log (r_b / r) = (V_b - V) / 2 (V_o - V)$$

数 2 8 に示す軌道上での電位 V は、角度 β の関数である。この角度 β を媒介変数として、数 2 8 より電位 V を計算し、数 3 3 よりイオンビーム 4 の設計上での軌道半径を $r = r_o$ として与えることで、内側の偏向電極 3 2 a の半径 r_a が求まる。同様にして、数 3 4 より、外側の偏向電極 3 2 b の半径 r_b が求まる。これらを数 3 5 に示す。

[数 3 5]

$$r_a = r_o \exp \{ - (V - V_o) / 2 (V_o - V) \}$$

$$r_b = r_o \exp \{ (V_b - V) / 2 (V_o - V) \}$$

上記電位 V は、内外の偏向電極 3 2 a、3 2 b の電圧 V_o 、 V_b に挟まれるために、両者の中間の電位、即ち $V_b > V > V_o$ でなければならない。また、イオンビーム 4 が静電偏向器 3 0 を通過して外に出て行くためには $V_o > V$ でなければならない。これらの条件内で、数 3 5 より、 $r_b > r_o > r_a$ でイオンビーム 4 が偏向電極 3 2 a、3 2 b 間を通過することが分かる。

内外の偏向電極 3 2 a、3 2 b の電圧 V_o 、 V_b を主眼にして表せば、数 3 1、数 3 2 より、 $r = r_o$ として、次式で与えられる。

[数 3 6]

$$V_a = V - 2 (V_o - V) \log (r_o / r_a)$$

$$V_b = V + 2 (V_o - V) \log (r_b / r_o)$$

上記数 3 5 と数 3 6 とは、互いに数学的に等価の関係にある。従って、数 3 5 または数 3 6 の関係を満たすようにすれば、イオンビーム 4 の設計上の軌道半径上でイオンビーム 4 の所定の加速または減速を円滑に行うことができる。その場合、上記関係を厳密に満たすのが最も好ましいけれども、現実的には、少しのずれは許されるので、上記関係を実質的に満たせば良い。換言すれば、上記関係をほぼ満たせば良い。

実際の静電偏向器 3 0 の仕様の例としては、次のようなものが採り得る。

(a) 電圧 V_o 、 V_b を一定として、角度 β に対して半径 r_a 、 r_b を変える。

(b) 半径 r_a 、 r_b を一定として、角度 β に対して電圧 V_a 、 V_b を変える。
 この場合は、印加電圧 V_a 、 V_b を変えるために、偏向電極 32 a、32 b を複数組に分ける。

(c) 軌道半径 r_0 を変える

(d) 以上の組み合わせを採用する。

厳密には、静電偏向器 30 の最適な電極形状は、ビームエネルギーや加減速等の条件でそれぞれ異なる。低エネルギーの場合は、イオンビーム 4 のエネルギーが低いために細かい電場のリップルが無視しにくくなるために、この場合の電極形状は特に重要である。しかし、高エネルギーになれば、電極形状は完全に適していなくても、平均的なものであれば、ビーム軌道上では同様な電場を生じているために、ビーム軌道に大きな違いは出ないため、細かい電場のリップルは無視できる。

一つの方法として、減速モードに適した多数の偏向電極の組を作り、加速モードに対しては、それら多数組の偏向電極にそれぞれ平均的な電圧を印加することで、同じ偏向電極で、加速モードに対応させることもできる。減速モードのみでは多数の電極を必ずしも必要としないが、高エネルギーモード（即ち加速モード）にも対応するために、多数の電極の方が好ましい。

もう一つの方法としては、比較的製作しやすい多数の半径一定の断面円弧状の偏向電極を用いて、その各々に、平均的な電圧を印加することによって、加減速の両モードに対応させる方法も採り得る。

あるいは、内外の偏向電極の角度をそれぞれ機械的に操作することによって、電極角度と電圧とを変えて、最適な運転をする方法も採り得る。

図 22 は、4 組の出口に向かって広がっている偏向電極 32 a₁ ~ 32 a₄、32 b₁ ~ 32 b₄ を有する静電偏向器 30 において、イオンビーム 4 をエネルギー 20 keV から 5 keV へと減速する場合の例である。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 32 a ₁ : -20.3 kV、 | 32 b ₁ : -5.2 kV |
| 32 a ₂ : -12.1 kV、 | 32 b ₂ : -1.9 kV |

$$32a_3 : -6.6 \text{ kV}, \quad 32b_3 : 0.2 \text{ kV}$$

$$32a_4 : -2.8 \text{ kV}, \quad 32b_4 : 1.8 \text{ kV}$$

前記 $r_a = 0.35$ [m]、 $r_b = 0.51$ [m]、 $r_c = 0.4$ [m]、前記電位 $V_1 = -15$ [kV]、 $V_2 = 0$ [V]、 $\beta_{\text{start}} = 90$ [度]、 $\beta_{\text{end}} = 180$ [度]、 $\log(r_c/r_a) = 0.1335$ 、 $\log(r_b/r_c) = 0.24295$ とし、偏向電極の初期位置 $\beta = 90$ [度] からビーム偏向方向に偏向電極を伸ばすと、 β_{start} で前記電位 $V = V_1$ であるから、前記数 36 より次式となる。

[数 37]

$$V_a = -1500 - 2 \times 0.1335 \times (5000 + 15000) = -20340 \text{ [V]}$$

$$V_b = -1500 + 2 \times 0.24295 \times (5000 + 15000) = -5282 \text{ [V]}$$

このようにして、電圧 V_a 、 V_b が決まれば、数 35 より半径 r_a 、 r_b を角度 β に対して計算して求め、それに設定する。この例では、前記電位 V は数 28 より、 $V = V_b$ になるのが、 $\beta = 148.3$ [度] になり、この角度を越すと $V > V_b$ になり適用限界が来る。この場合、数 35 より r_b は $V_b = V$ で $r_b = r_c$ になるので、この角度を越すと、 $r_b < r_c$ となり、外側の偏向電極 32b がイオンビーム 4 の軌道に入り込むことになる。このような場合には、その手前の角度 β_s を取り、次の電極組を設定すれば良い。例えば、再度半径 r_a 、 r_b の初期値を取り（この例の場合は $r_a = 0.35$ [m]、 $r_b = 0.51$ [m]）、数 28 から、角度 β_s に対する軌道上の電位 $V(\beta_s)$ を求め、前記と同様に数 36 により、再び電圧 V_a 、 V_b を決定し、数 35 より角度 β に対する半径 r_a 、 r_b を計算すれば良い。前記手前の角度 β_s としては、イオンビーム 4 の断面寸法（ビーム径）を考慮して、内外の偏向電極 32a、32b が、イオンビーム 4 に当たらないように選ばれば良い。以上の理由から、図 22 の例では、偏向電極を段差の付いた 4 組にしている。

図 22 の偏向電極 32a₁～32a₄、32b₁～32b₄ の半径 r_a 、 r_b の角度 β に対する依存性を図 23 に示す。各組の内外の偏向電極間の間隔は、角度

β が大きくなるに従って、即ち 静電偏向器 30 の出口に向かうに従って広がっている。

図 22 および図 23 の例は、偏向電極の数を 4 組に省略して示しているが、当該組の数は 4 組に限定されるものではなく、それより少なくしても良いし、多くしても良い。組数を多くすると、イオンビーム 4 の軌道の乱れ（発散）をより少なくして、イオンビーム 4 をより円滑に減速（または加速）することができる。後述する図 24～図 26 の例においても同様のことが言える。

この図 22 の例では、図 21 の例に比べて、イオンビーム 4 の軌道の乱れが少なく、イオンビーム 4 が円滑に減速されていることが分かる。即ちビーム軌道の揃ったイオンビーム 4 を静電偏向器 30 から取り出すことが可能である。

図 24 は、4 組の出口に向かつて狭くなっている偏向電極 $32a_1 \sim 32a_4$ 、 $32b_1 \sim 32b_4$ を有する静電偏向器 30 において、イオンビーム 4 をエネルギー 40 keV から 200 keV へと加速する場合の例である。図 22 の場合とは反対に、各組における内外の偏向電極間の間隔は、角度 β が大きくなるに従って、即ち静電偏向器 30 の出口に向かうに従って狭くなっている。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

| | |
|------------------------------|----------------------------|
| $32a_1 : 125.5 \text{ kV}$ 、 | $32b_1 : 177.8 \text{ kV}$ |
| $32a_2 : 85.8 \text{ kV}$ 、 | $32b_2 : 166.0 \text{ kV}$ |
| $32a_3 : 26.2 \text{ kV}$ 、 | $32b_3 : 148.3 \text{ kV}$ |
| $32a_4 : -66.4 \text{ kV}$ 、 | $32b_4 : 120.7 \text{ kV}$ |

この図 24 の例の場合も、イオンビーム 4 の軌道の乱れが少なく、イオンビーム 4 が円滑に加速されていることが分かる。即ちビーム軌道の揃ったイオンビーム 4 を静電偏向器 30 から取り出すことが可能である。

図 25 は、9 組の断面円弧状の偏向電極 $32a_1 \sim 32a_9$ 、 $32b_1 \sim 32b_9$ を有する静電偏向器 30 において、イオンビーム 4 をエネルギー 20 keV から 5 keV へと減速する場合の例である。内外の偏向電極の前記半径 r_a 、 r_b は、それぞれ一定である。即ち、内外の偏向電極間の間隔は、静電偏向器 30 の入口から出口に至るまで一定である。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

| | |
|---------------------|-------------------|
| $32a_1$: -22.7 kV、 | $32b_1$: -9.6 kV |
| $32a_2$: -20.3 kV、 | $32b_2$: -8.3 kV |
| $32a_3$: -17.8 kV、 | $32b_3$: -7.1 kV |
| $32a_4$: -15.4 kV、 | $32b_4$: -5.8 kV |
| $32a_5$: -13.0 kV、 | $32b_5$: -4.5 kV |
| $32a_6$: -10.6 kV、 | $32b_6$: -3.2 kV |
| $32a_7$: -8.2 kV、 | $32b_7$: -2.0 kV |
| $32a_8$: -5.8 kV、 | $32b_8$: -0.7 kV |
| $32a_9$: -3.4 kV、 | $32b_9$: 0.5 kV |

この図25の例の場合も、イオンビーム4の軌道の乱れが少なく、イオンビーム4が円滑に減速されていることが分かる。即ちビーム軌道の揃ったイオンビーム4を静電偏向器30から取り出すことが可能である。

図26は、9組の断面円弧状の偏向電極 $32a_1 \sim 32a_9$ 、 $32b_1 \sim 32b_9$ を有する静電偏向器30において、イオンビーム4をエネルギー40 keVから200 keVへと加速する場合の例である。内外の偏向電極の前記半径 r_a 、 r_b は、それぞれ一定である。即ち、内外の偏向電極間の間隔は、静電偏向器30の入口から出口に至るまで一定である。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

| | |
|---------------------|--------------------|
| $32a_1$: 129.2 kV、 | $32b_1$: 162.6 kV |
| $32a_2$: 103.5 kV、 | $32b_2$: 149.0 kV |
| $32a_3$: 77.8 kV、 | $32b_3$: 135.4 kV |
| $32a_4$: 52.1 kV、 | $32b_4$: 121.8 kV |
| $32a_5$: 26.4 kV、 | $32b_5$: 108.2 kV |
| $32a_6$: 0.7 kV、 | $32b_6$: 94.6 kV |
| $32a_7$: -24.9 kV、 | $32b_7$: 81.0 kV |
| $32a_8$: -50.6 kV、 | $32b_8$: 67.4 kV |
| $32a_9$: -76.4 kV、 | $32b_9$: 53.9 kV |

この図 2 6 の例の場合も、イオンビーム 4 の軌道の乱れが少なく、イオンビーム 4 が円滑に加速されていることが分かる。即ちビーム軌道の揃ったイオンビーム 4 を静電偏向器 3 0 から取り出すことが可能である。

上記図 2 5 に示す静電偏向器 3 0 と、図 2 6 に示す静電偏向器 3 0 とは、それを構成する偏向電極の形状を互いに同一にすることができるので、イオンビーム 4 の減速と加速とに共用することができる。そして、減速と加速とで、電圧の掛け方を変えれば良い。

図 2 7 は、1 組の出口に向かって広がっている偏向電極 3 2 a、3 2 b を有する静電偏向器 3 0 において、イオンビーム 4 をエネルギー 2 0 k e V から 5 k e V へと減速する場合の例である。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

3 2 a : -19.2 k V、 3 2 b : 1.2 k V

この例のように出口に向かって広がっている 1 組の偏向電極によっても、イオンビーム 4 の軌道の乱れが少なく、イオンビーム 4 が円滑に減速されていることが分かる。即ち、ビーム軌道の揃ったイオンビーム 4 を静電偏向器 3 0 から取り出すことが可能である。

図 2 8 は、1 組の出口に向かって狭くなっている偏向電極 3 2 a、3 2 b を有する静電偏向器 3 0 において、イオンビーム 4 をエネルギー 4 0 k e V から 1 1 2 k e V へと加速する場合の例である。

各偏向電極の電圧は次のとおりである。

3 2 a : -35.8 k V、 3 2 b : 76.2 k V

この例のように出口に向かって狭くなっている 1 組の偏向電極によっても、イオンビーム 4 の軌道の乱れが少なく、イオンビーム 4 が円滑に加速されていることが分かる。即ち、ビーム軌道の揃ったイオンビーム 4 を静電偏向器 3 0 から取り出すことが可能である。

本発明を詳細にまた特定の実施態様を参照して説明したが、本発明の精神と範囲を逸脱することなく様々な変更や修正を加えることができることは当業者にと

って明らかである。

本出願は、2003 年 12 月 4 日出願の日本特許出願（特願 2003－405342）、2004 年 3 月 17 日出願の日本特許出願（特願 2004－76756）、に基づくものであり、その内容はここに参照として取り込まれる。

請 求 の 範 囲

1. イオンビームが入射され当該イオンビームを、一定の走査面内で一定の走査中心を中心にして走査して取り出す走査器と、

この走査器からのイオンビームが入射され当該イオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記走査中心を中心とする円弧状の偏向領域で、前記走査面に垂直な方向に進むように静電的に90度偏向して取り出す静電偏向器とを備えることを特徴とするイオンビーム装置。

2. イオンビームを射出するイオン源と、

このイオン源からのイオンビームが入射され当該イオンビームから所望質量のイオンビームを分離して取り出す質量分離電磁石と、

この質量分離電磁石からのイオンビームが入射され当該イオンビームを、一定の走査面内で一定の走査中心を中心にして走査して取り出す走査器と、

この走査器からのイオンビームが入射され当該イオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記走査中心を中心とする円弧状の偏向領域で、前記走査面に垂直な方向に進むように静電的に90度偏向して取り出す静電偏向器と、

イオン注入すべきターゲットを保持して当該ターゲットを、前記静電偏向器から取り出されたイオンビームに一定の角度で交差する方向に機械的に往復走査する走査機構とを備えることを特徴とするイオンビーム装置。

3. 前記走査機構は、前記ターゲットをその表面に平行に走査するものである、請求の範囲第2項記載のイオンビーム装置。

4. 前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する一対の偏向電極を有している、請求の範囲第1ないし3項のいずれかに記載のイオンビーム装置。

5. 一点で互いに直交する三つの軸をX軸、Y軸およびZ軸としたとき、前記走査器に入射するイオンビームは、Z軸に平行に前記走査器に入射するものであり、

前記走査器は、前記入射されたイオンビームをY-Z平面に平行な前記走査面内で前記走査中心を中心にして走査するものであり、

前記静電偏向器は、前記入射されたイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを90度偏向させてX軸に平行に出射するものであり、

前記走査かつ偏向されたイオンビームの中で所望エネルギーを有するイオンビームの1本のイオンビームの軌道を考えたとき、当該軌道は、直線部の先端に、X軸に平行になるように弧状に90度曲がった弧状部を有しており、

前記静電偏向器を構成する一対の偏向電極の相対向面は、それぞれ、前記1本のイオンビームの軌道を前記走査中心を通りX軸に平行な軸を中心にして前記走査方向に所定角度回転させたときに前記弧状部が描く回転面に概ね沿う形状をしている、請求の範囲第4項記載のイオンビーム装置。

6. 前記偏向電極を構成する一対の偏向電極の相対向面は、それぞれ、トーラスを、前記走査中心を通りX軸に平行なトーラス中心軸を中心とする円周方向に所定角度だけ切り取り、かつトーラスの縦断面の外周が形成する円弧を90度だけ切り取った形状をしている、請求の範囲第5項記載のイオンビーム装置。

7. 前記偏向電極を構成する一対の偏向電極の相対向面は、それぞれ、前記回転面に概ね沿う複数の面を組み合わせ形成されている、請求の範囲第5または6項記載のイオンビーム装置。

8. 前記静電偏向器を構成する一対の偏向電極の内の少なくとも一方は、偏向角の増大方向に隙間をあけて複数に分割されている、請求の範囲第4ないし7項いずれかに記載のイオンビーム装置。

9. 前記静電偏向器を構成する一対の偏向電極の少なくとも相対向面は、それぞれ、カーボンで形成されている、請求の範囲第4ないし8項いずれかに記載のイオンビーム装置。

10. 前記静電偏向器を構成する一対の偏向電極に、直流電圧であって接地電位に対して対称の偏向電圧をそれぞれ印加する偏向電源を備えている、請求の範囲第4ないし9項いずれかに記載のイオンビーム装置。

11. 前記走査器は、それに入射するイオンビームをその入射軸に対して対称に走査するものである、請求の範囲第1ないし10項いずれかに記載のイオンビーム装置。

12. 前記走査器は、それに入射するイオンビームをその入射軸に対して片側方向においてのみ走査するものである、請求の範囲第1ないし10項いずれかに記載のイオンビーム装置。

13. 前記走査器と静電偏向器との間に設けられていて前記走査されたイオンビームを静電的に加速または減速する加減速器を備えており、

この加減速器はイオンビームの進行方向に一定の間隔をあけて配置された少なくとも2枚の電極を有しており、この各電極は、前記走査中心を中心とする円弧状をしており、かつ、前記走査されたイオンビームの走査方向の幅よりも幅の広いビーム通過穴を有している、請求の範囲第1ないし12項いずれかに記載のイオンビーム装置。

14. 前記加減速器を構成する入口の電極が、所望質量のイオンビームを通過させ不所望質量のイオンを阻止する分析スリットを兼ねている、請求の範囲第13項に記載のイオンビーム装置。

15. 前記静電偏向器の出口付近に、所望エネルギーのイオンビームを通し不所望エネルギーのイオンを阻止するビームマスクを設けている、請求の範囲第1ないし14項いずれかに記載のイオンビーム装置。

16. 前記静電偏向器を出たイオンビームの、その進行方向に垂直な走査ビーム断面の形状は弧状をしており、前記ビームマスクは、この弧状の走査ビーム断面にほぼ相似形の弧状のビーム通過穴を有している、請求の範囲第15項記載のイオンビーム装置。

17. 前記走査器は互いに平行な一対の走査電極を有しており、この一対の走査電極間に、

$$V_s = c t / (1 - c^2 t^2)^{1/2}、(cは定数、tは時間)$$

で表される走査電圧 V_s を印加する走査電源を備えている、請求の範囲第1ないし16項のいずれかに記載のイオンビーム装置。

18. 前記静電偏向器の入口の電位は出口の電位よりも低く、前記静電偏向器は、それに入射するイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前

記のように偏向させながら減速するものである請求の範囲第 1 ないし 3 項のいずれかに記載のイオンビーム装置。

19. 前記静電偏向器の入口の電位は出口の電位よりも高く、前記静電偏向器は、それに入射するイオンビームの内の所望エネルギーのイオンビームを、前記のように偏向させながら加速するものである請求の範囲第 1 ないし 3 項のいずれかに記載のイオンビーム装置。

20. 前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極の相対向面間の間隔は、出口に向かうに従って広がっている請求の範囲第 18 項記載のイオンビーム装置。

21. 前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極の相対向面間の間隔は、出口に向かうに従って狭くなっている請求の範囲第 19 項に記載のイオンビーム装置。

22. 前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極は、それぞれ偏向角の増大方向に n 個 (n は 2 以上の整数) に分割されていて n 組の偏向電極を形成しており、当該 n 組の偏向電極の内の内側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{a1} 、 V_{a2} 、 \dots 、 V_{an} とし、当該 n 組の偏向電極の内の外側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{b1} 、 V_{b2} 、 \dots 、 V_{bn} としたとき、次の関係を満たしている請求の範囲第 18 項記載のイオンビーム装置。

$$V_{a1} < V_{a2} < \dots < V_{an},$$

$$V_{b1} < V_{b2} < \dots < V_{bn}, \text{ かつ、}$$

$$V_{a1} < V_{b1}, V_{a2} < V_{b2}, \dots, V_{an} < V_{bn}$$

23. 前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極は、それぞれ偏向角の増大方向に n 個 (n は 2 以上の整数) に分割されていて n 組の偏向電極を形成しており、当該 n 組の偏向電極の内の内側の偏向電極に印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{a1} 、 V_{a2} 、 \dots 、 V_{an} とし、当該 n 組の偏向電極の内の外側の偏向電極に

印加される電圧を、入口側からそれぞれ V_{b1} 、 V_{b2} 、 \dots 、 V_{bn} としたとき、次の関係を満たしている請求の範囲第 19 項記載のイオンビーム装置。

$$V_{a1} > V_{a2} > \dots > V_{an},$$

$$V_{b1} > V_{b2} > \dots > V_{bn}, \text{ かつ、}$$

$$V_{a1} < V_{b1}, V_{a2} < V_{b2}, \dots, V_{an} < V_{bn}.$$

24. 前記 n 組の偏向電極の相対向面間の間隔は、静電偏向器の入口から出口に至るまで一定である請求の範囲第 22 または 23 項記載のイオンビーム装置。

25. 前記 n 組の偏向電極の各組において、その相対向面間の間隔は、それぞれ、出口に向かうに従って広がっている請求の範囲第 22 項に記載のイオンビーム装置。

26. 前記 n 組の偏向電極の各組において、その相対向面間の間隔は、それぞれ、出口に向かうに従って狭くなっている請求の範囲第 23 項に記載のイオンビーム装置。

27. 前記静電偏向器は、間隔をあけて相対向する内側および外側の偏向電極を有しており、当該内側および外側の偏向電極の相対向面の半径をそれぞれ r_a および r_b とし、内側および外側の偏向電極に印加される電圧をそれぞれ V_a および V_b とし、静電偏向器内における所望エネルギーのイオンビームの軌道上での電位を V とし、静電偏向器の出口での当該イオンビームの運動エネルギーに対応する電圧を V_0 とし、静電偏向器内における当該イオンビームの設計上の軌道半径を r_0 としたとき、次式またはそれと数学的に等価な関係を実質的に満たしている請求の範囲第 18 または 19 項に記載のイオンビーム装置。

$$V_a = V - 2 (V_0 - V) \log (r_0 / r_a), \text{ かつ、}$$

$$V_b = V + 2 (V_0 - V) \log (r_b / r_0)$$

図 1

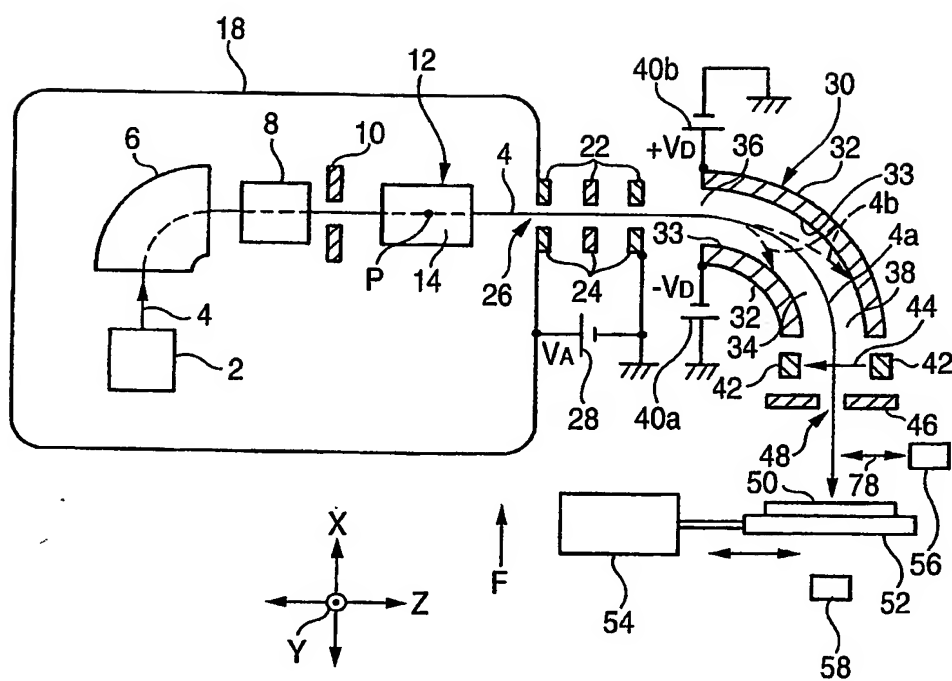


図 2

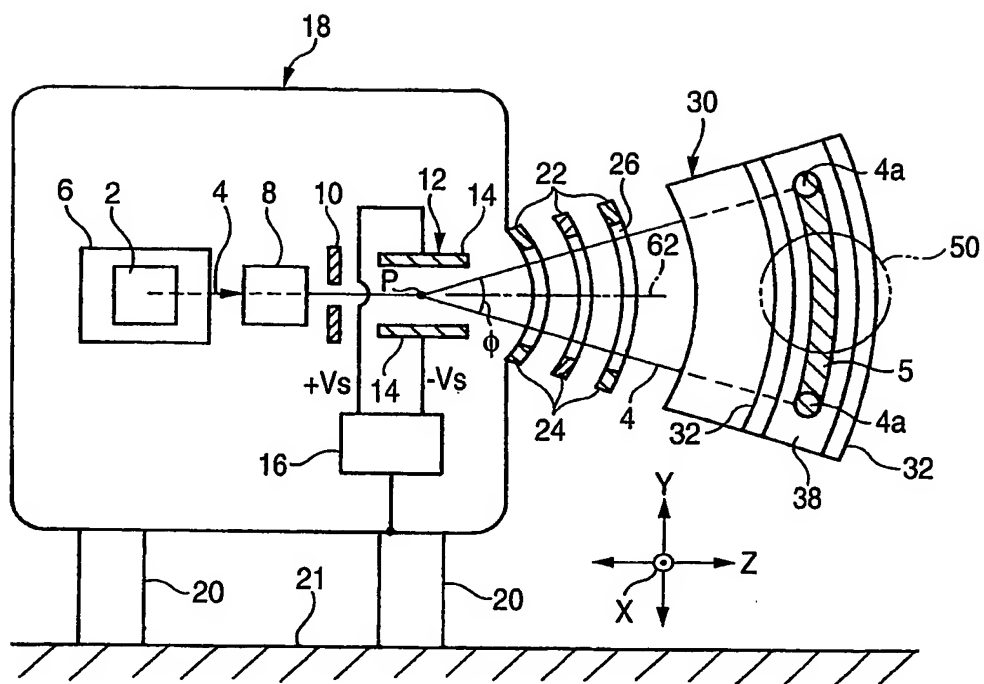


図 3

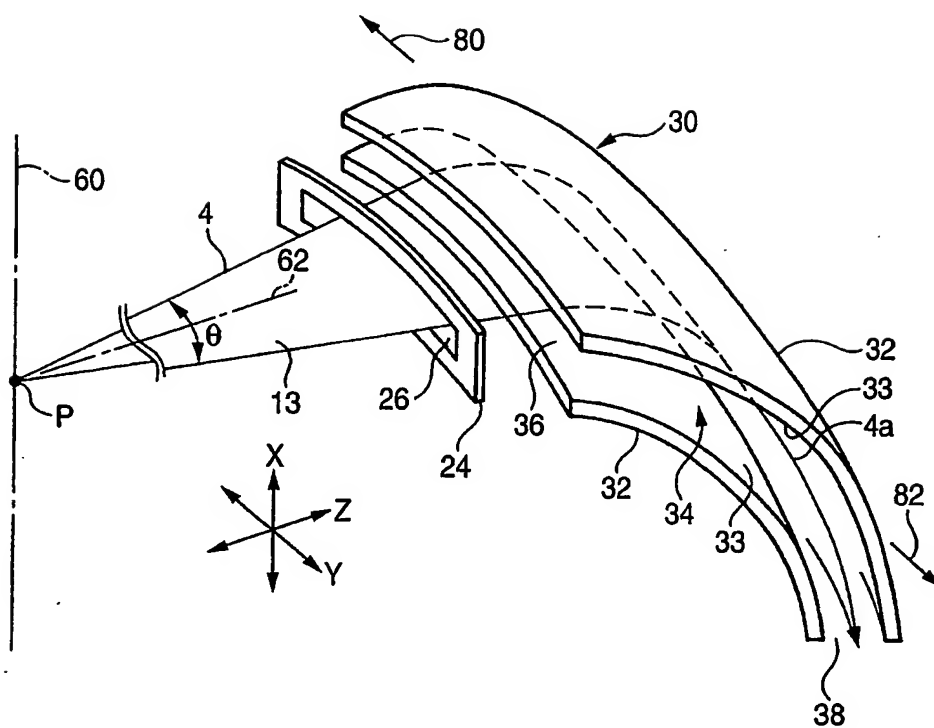


図 4

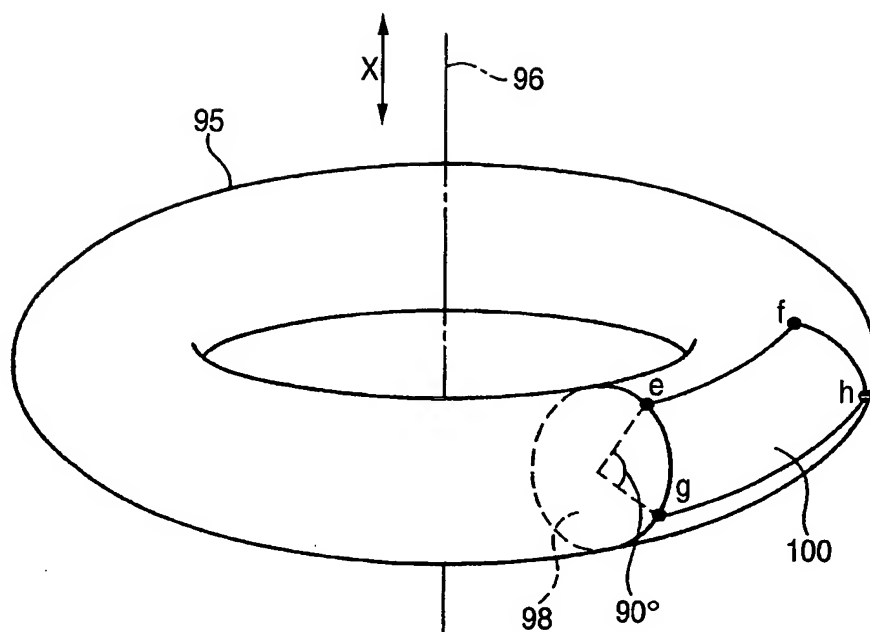


図 5

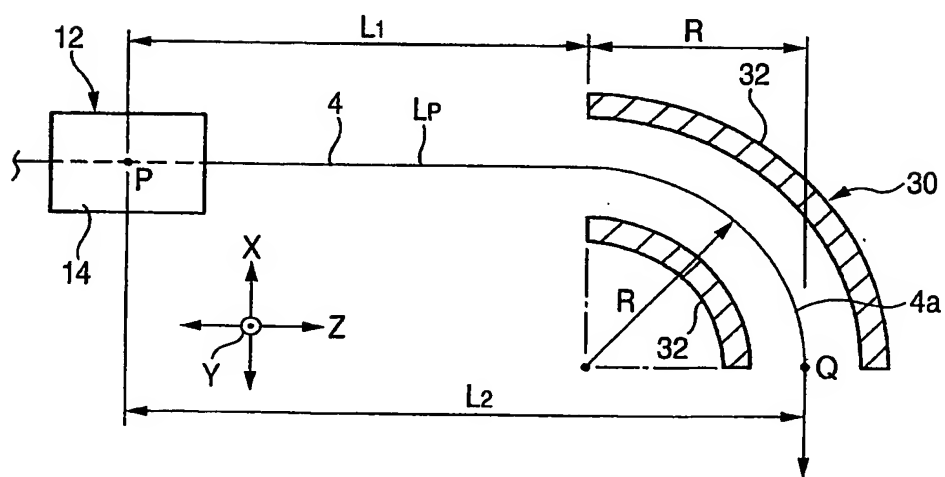


図 6

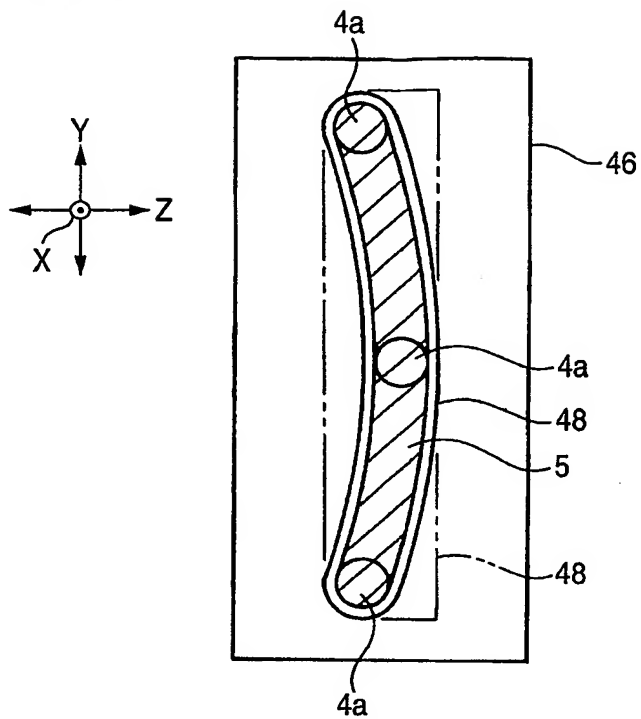


図 7

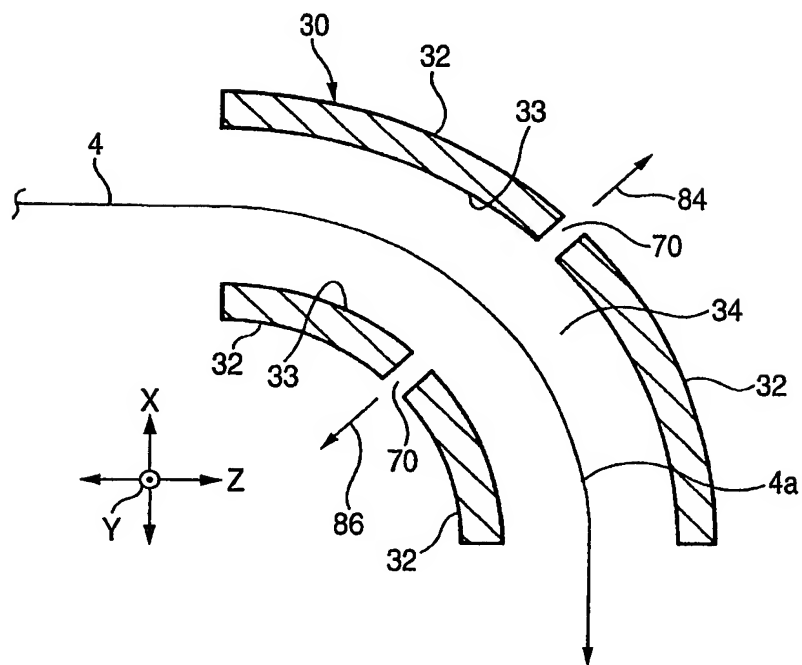


図 8

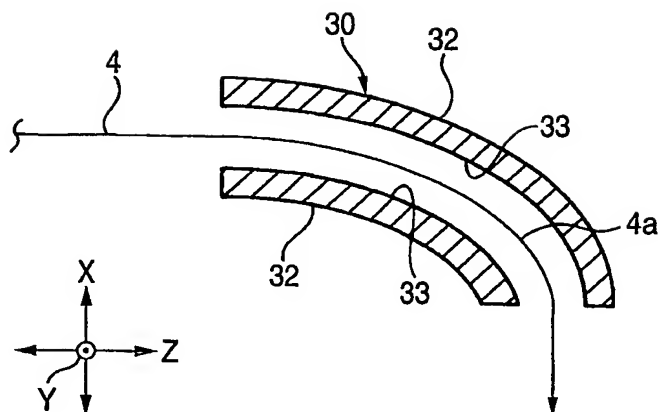


図 9

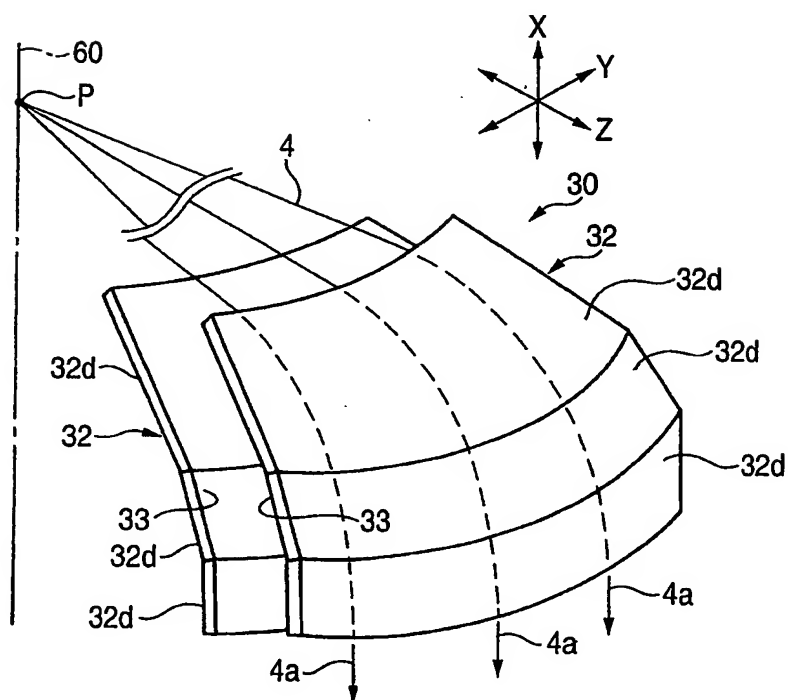


図 10

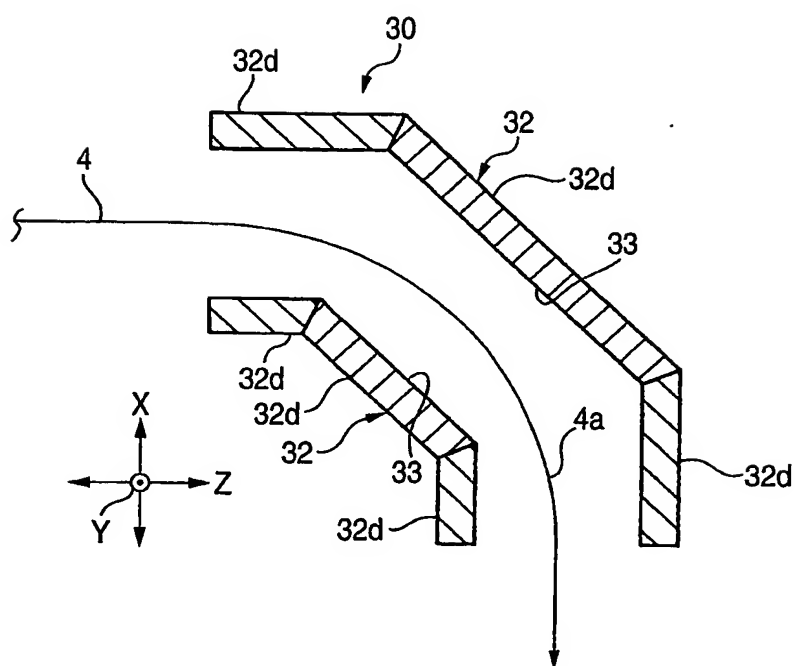


図 11

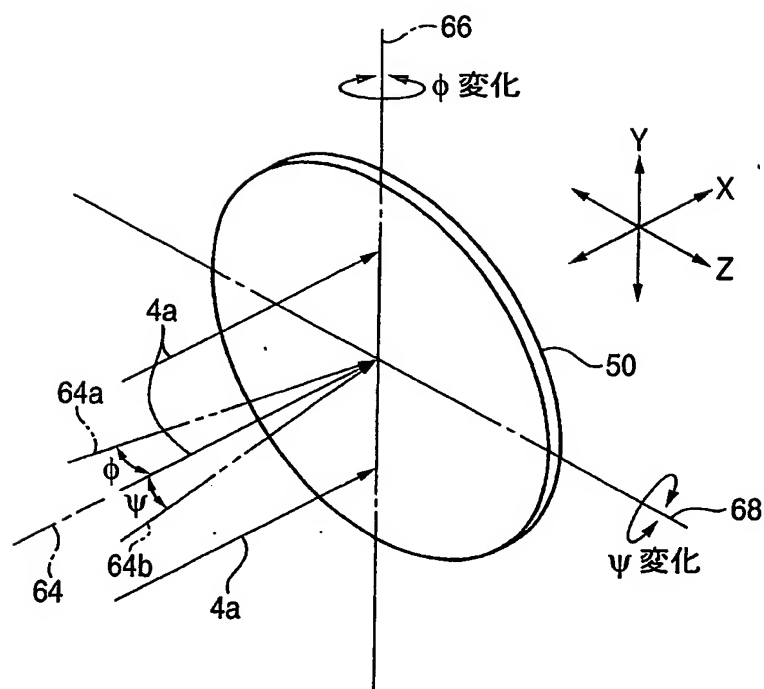


図 12

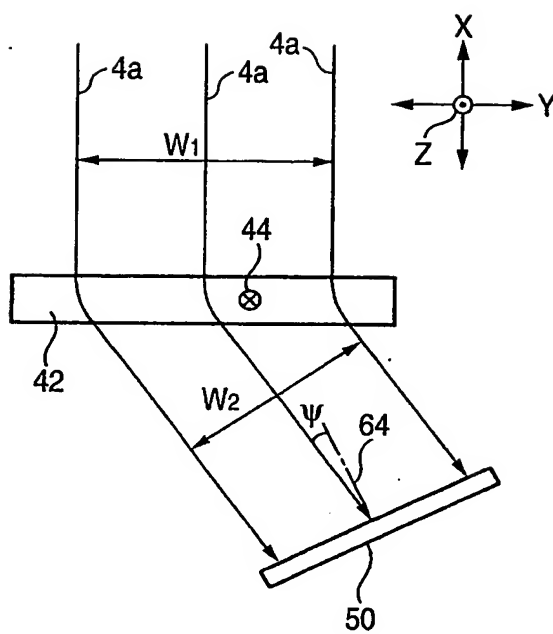


図 13

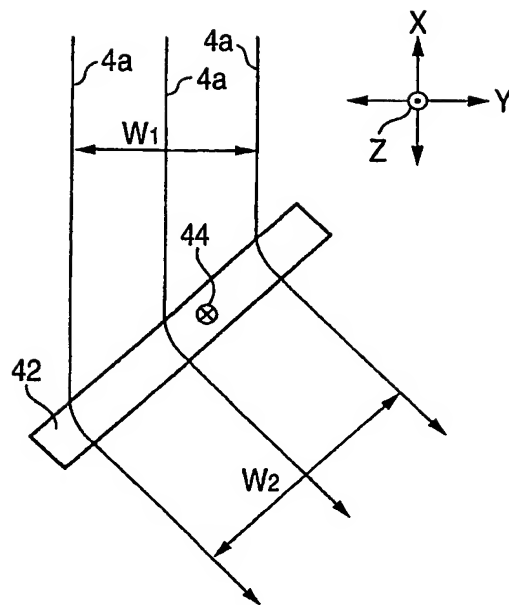


図 14

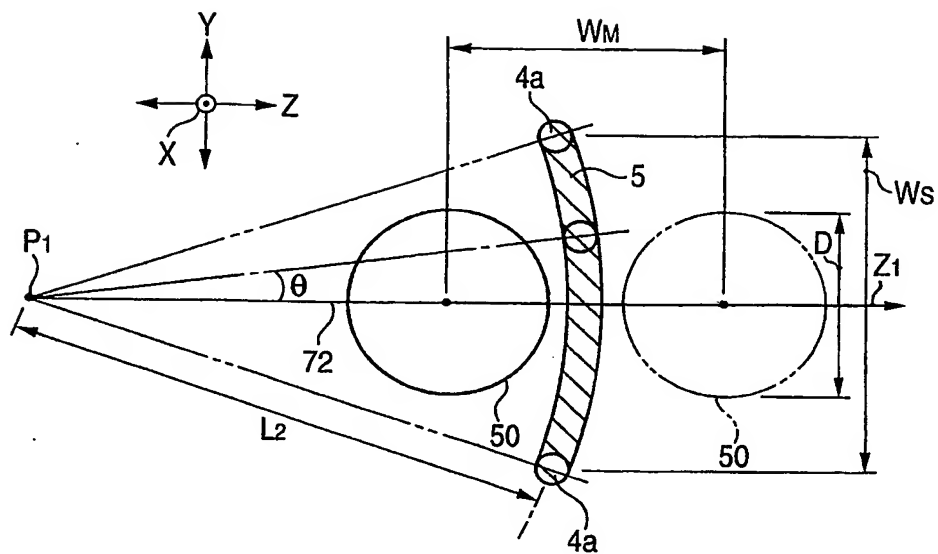


図 15

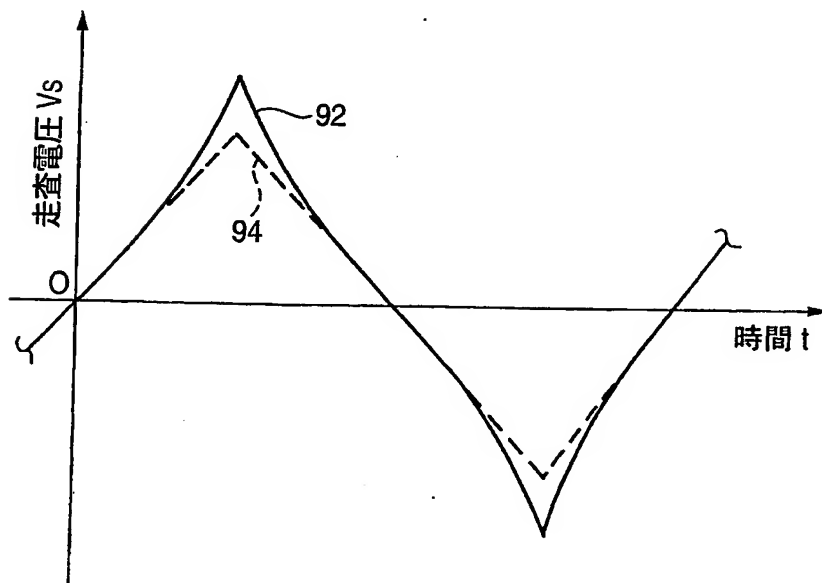


図 16

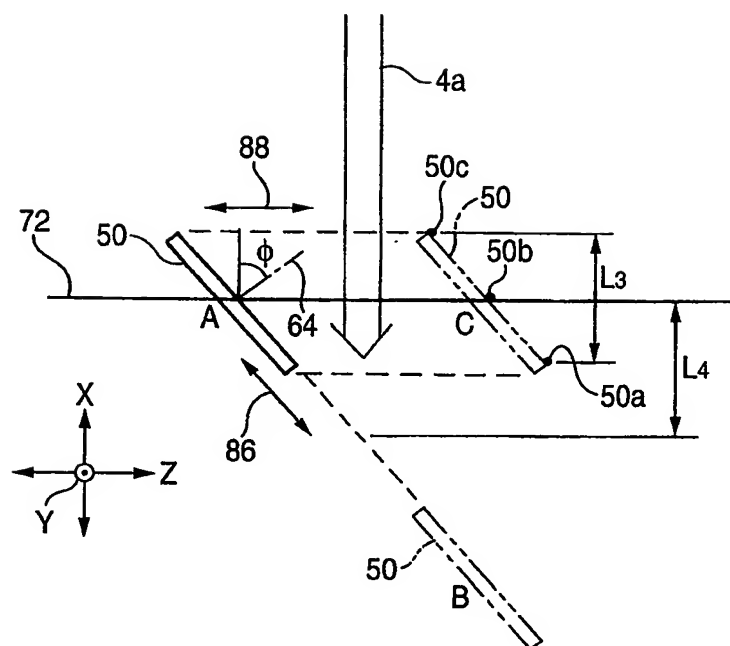


図 17 (A)

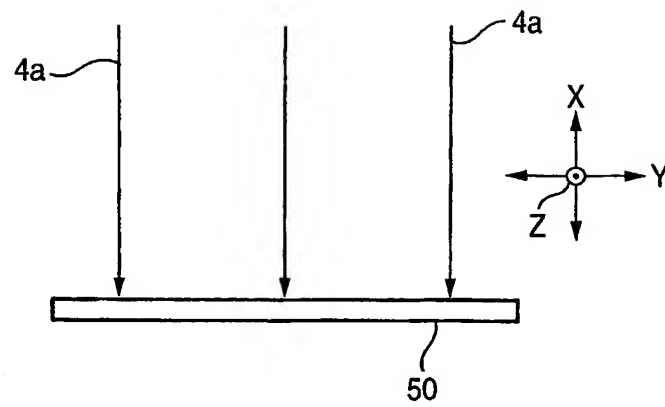


図 17 (B)

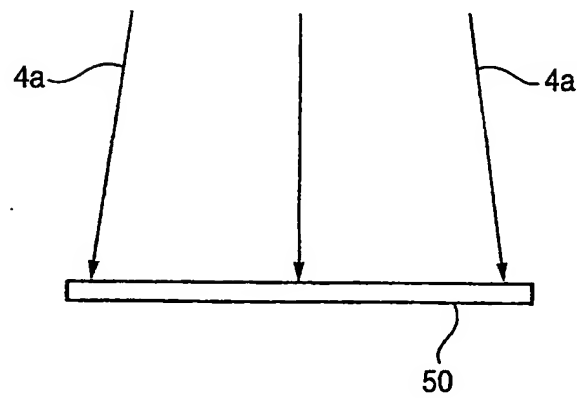


図 17 (C)

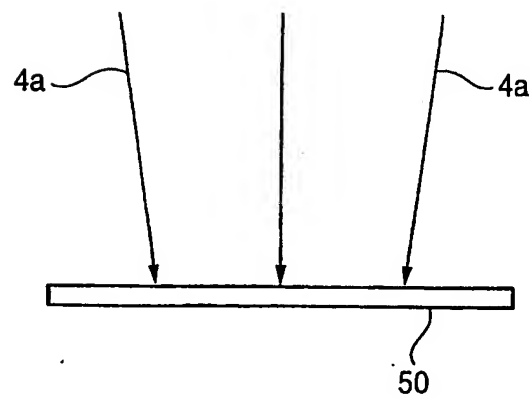


図 18

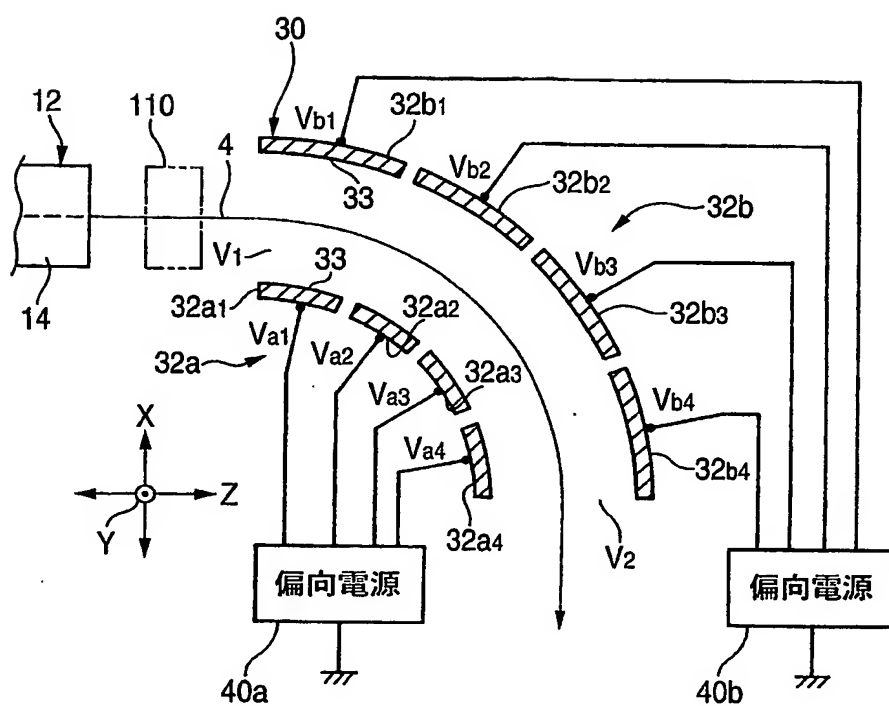


図 19

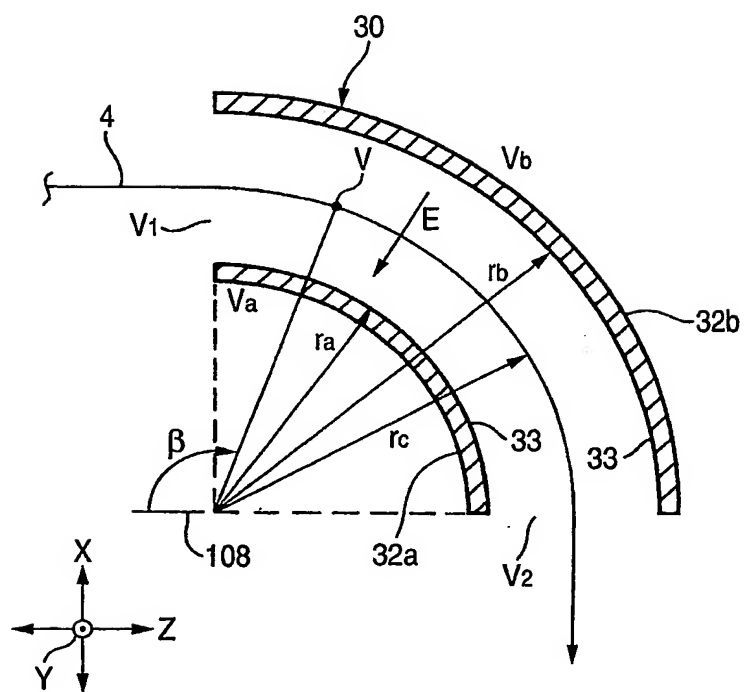


図 20

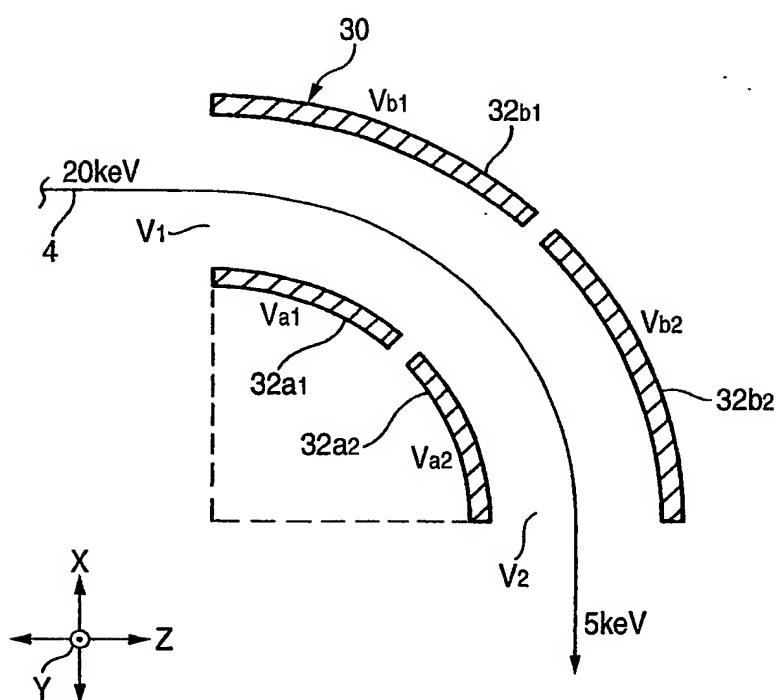


図 21

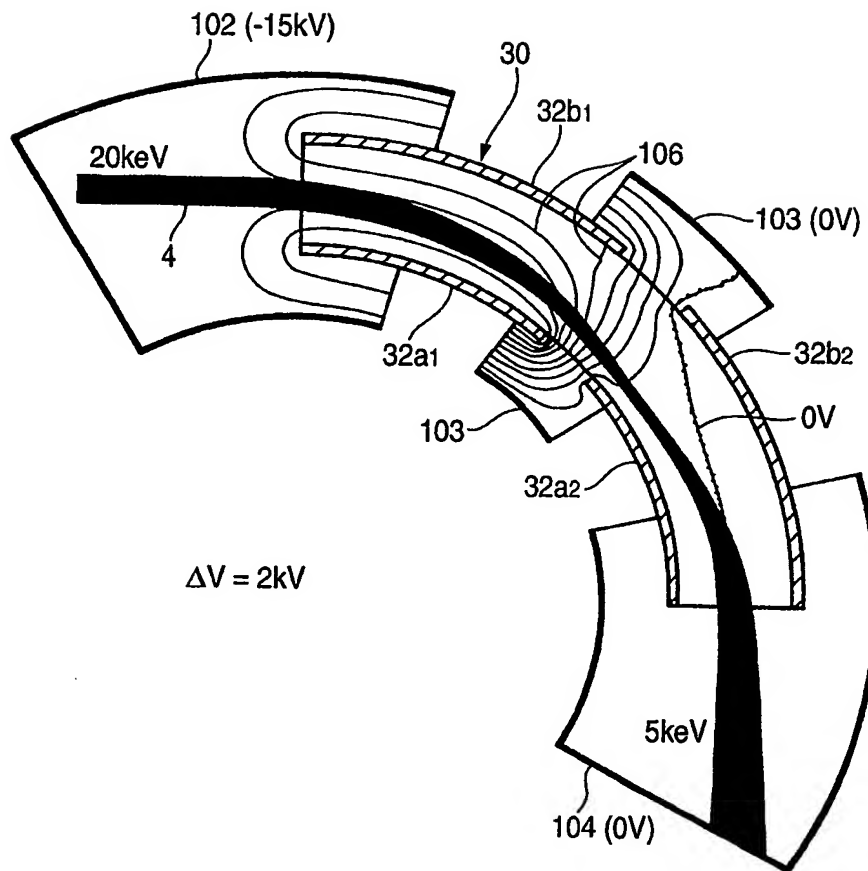


図 22

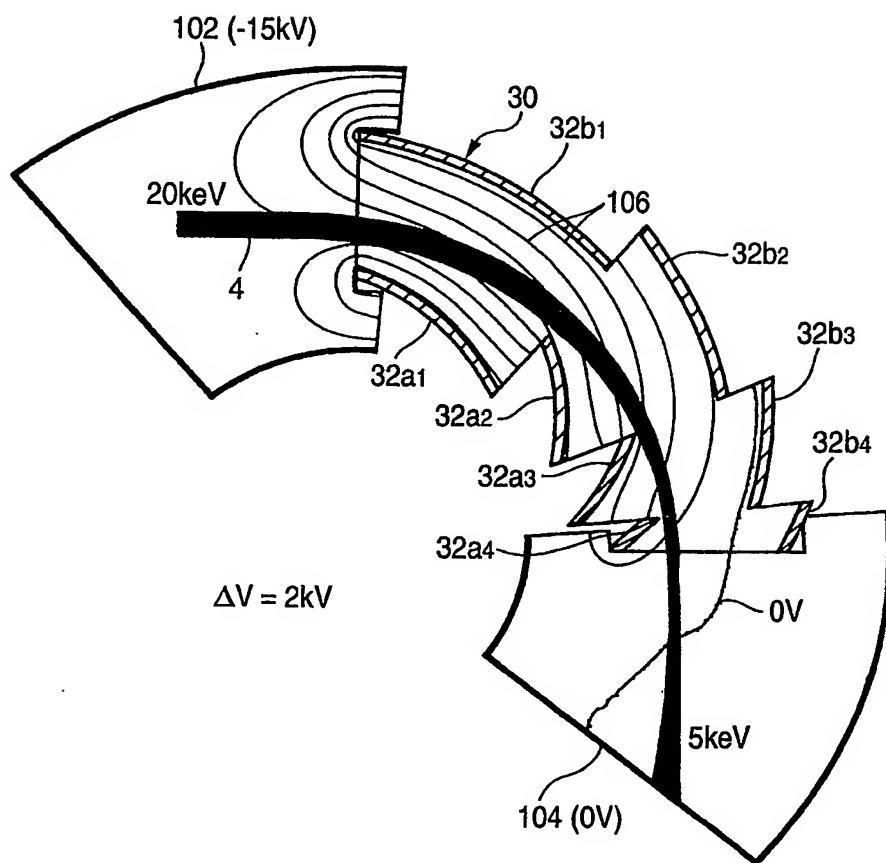


図 23

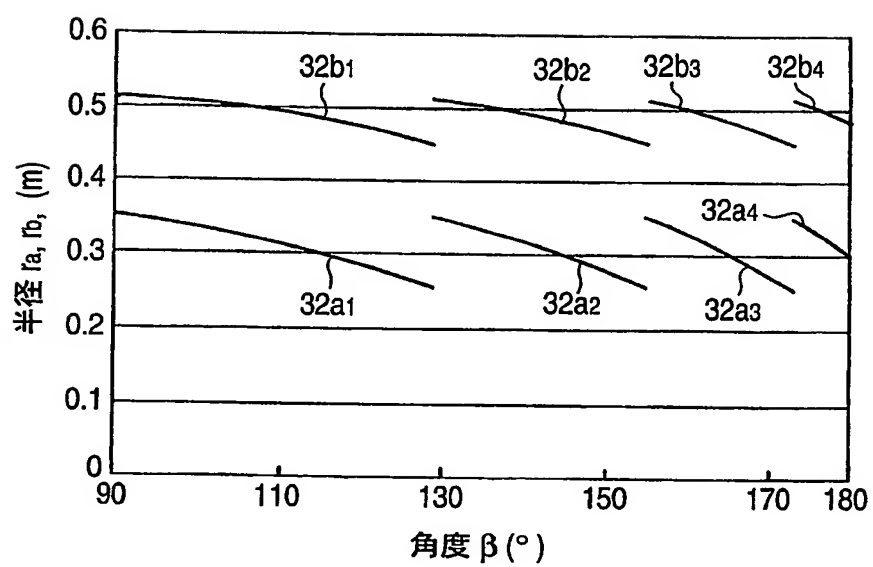


図 24

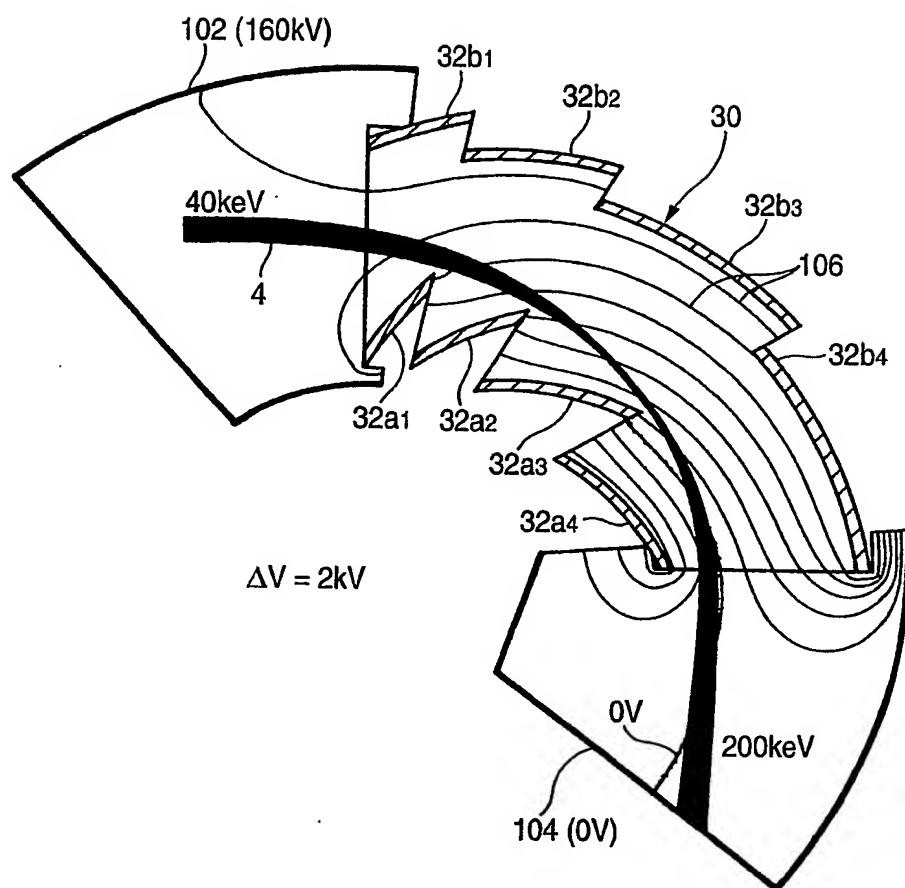


図 25

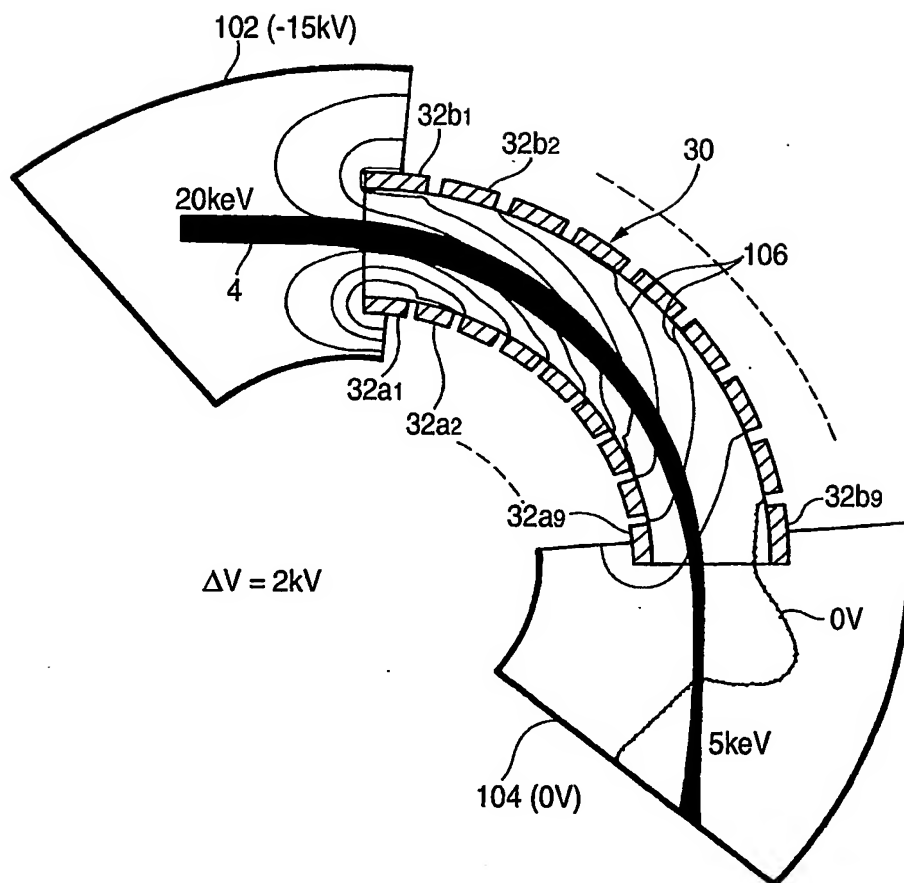


図 26

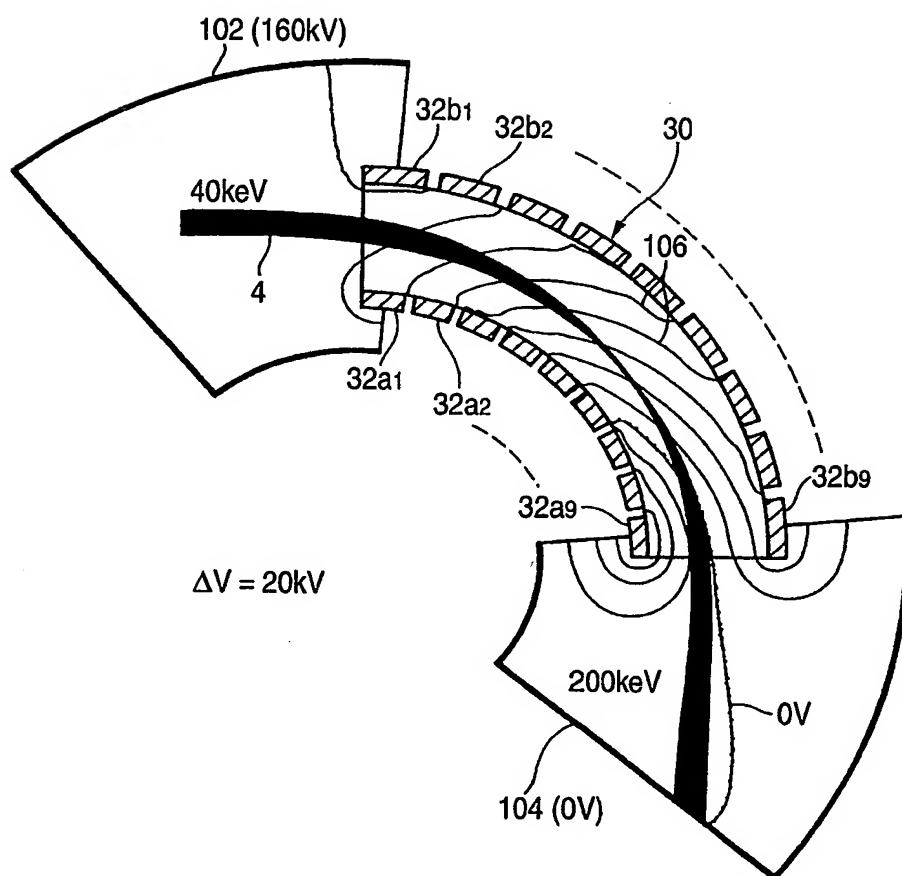


図 27

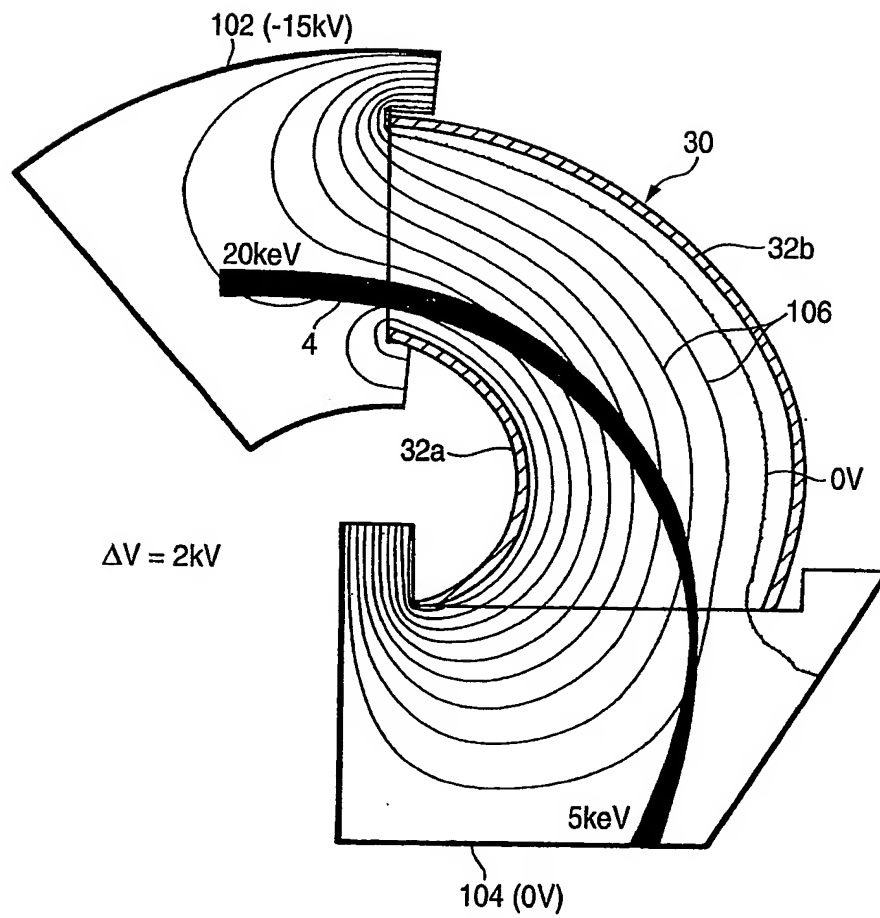


図 28

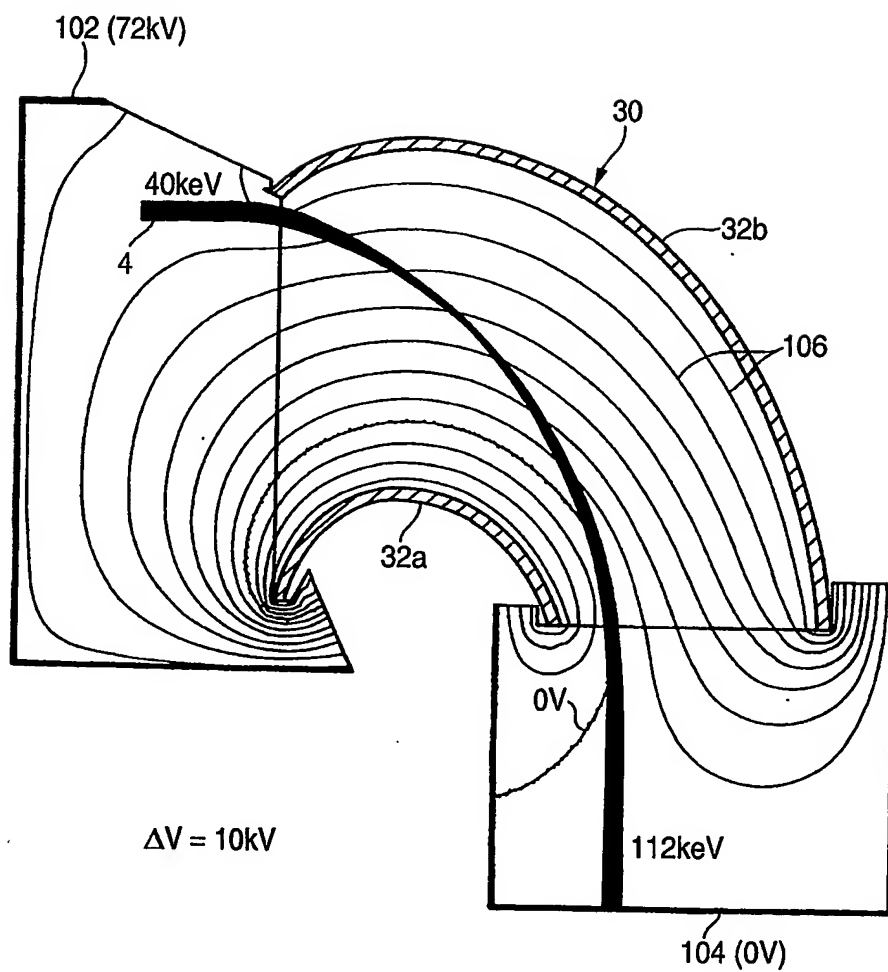


図 29

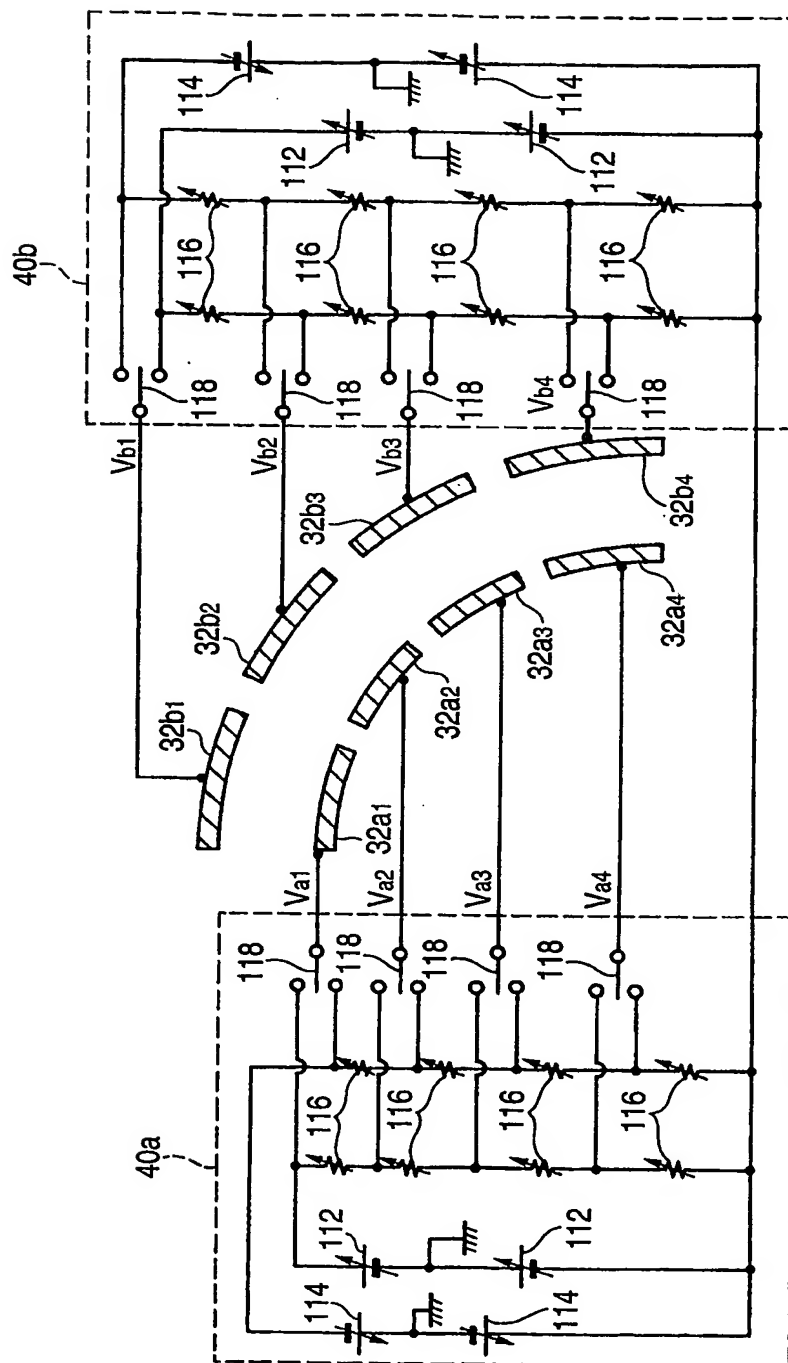


図 30

